Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

5 CITCA
Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada
del 26 al 28 de noviembre, 2025
Cuernavaca, Morelos

MEMORIA DEL

5TO CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA (CITCA)

"Avances en investigación y Desarrollo Tecnológico"

Cuernavaca, Morelos, México
del 26 al 28 de noviembre de 2025

BIENVENIDA

El Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) presenta el **5.° Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA),** el cual se consolida como un espacio fundamental para divulgar los avances en investigación aplicada y desarrollo tecnológico, así como para fomentar el análisis crítico en un entorno de respeto, apertura y colaboración entre especialistas, investigadoras, investigadores, estudiantes y profesionales del área.

Esta memoria tiene como objetivo generar un diálogo constructivo que promueva la creación de redes de colaboración y fortalezca las capacidades científicas y tecnológicas de nuestro país. Estamos convencidas y convencidos de que encuentros como este contribuyen de manera significativa a la construcción colectiva del conocimiento y al impulso del desarrollo nacional.

En esta edición se recibieron **355 contribuciones**, de las cuales **186 fueron aceptadas** para su publicación en la **memoria del congreso** (96 artículos y 90 carteles), y **110 contribuciones** fueron seleccionadas para su publicación en la **Revista de Tecnología y Ciencia Aplicada** (ISSN: 2992-8338). Además, se llevaron a cabo nueve conferencias magistrales impartidas por especialistas de China, Colombia y México así como 6 talleres precongreso. Como parte del reconocimiento a la excelencia académica, se otorgaron premios a los mejores artículos y carteles presentados.

Agradecemos al **Tecnológico Nacional de México** por su permanente respaldo a este tipo de iniciativas académicas y científicas. Extendemos un especial reconocimiento al **Dr. Manuel Adam Medina**, presidente del comité organizador, así como al equipo editorial, personas revisoras y al gran equipo de trabajo que, con compromiso y dedicación, hicieron posible la realización de este congreso.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a quienes impartieron las conferencias magistrales:

- **Dr. Jesús Linares Flores**, Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- **Dr. Dong Li**, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura de la Universidad del Petróleo del Noreste, (China).
- **Dra. Tatiana Romero Castañón**, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).
- **Dr. David Arnoldo Valtiérrez,** Instituto Tecnológico de Delicias.
- **Ing. Jair Axel Lizarraga Velarde**, IBM University Program Manager.
- **Dr. Francisco Beltrán Carbajal**, UAM Azcapotzalco.
- **Dr. Roberto Antonio Vázquez Espinoza**, Universidad La Salle.
- **Dr. Omar Lengerke Pérez,** Universidad de Colombia.
- **Ing. Uriel Hernandez Martinez & Liu Jiayi,** Latín America Cloud Business Development Departament.

Gracias por compartir su experiencia y conocimientos con la comunidad participante; estamos seguras y seguros de que sus aportaciones serán de gran utilidad.

Reconocemos el esfuerzo y dedicación del **Comité Organizador** y del **Comité de Personas Revisoras**, cuyas evaluaciones y sugerencias enriquecieron significativamente las contribuciones recibidas. Agradecemos también al **Comité Organizador Estudiantil** por su entusiasmo y colaboración constante durante todo el evento.

Finalmente, nuestro mayor agradecimiento es para **las autoras y los autores**, ya que son ustedes quienes hacen posible este congreso. Su participación es la esencia misma de este encuentro académico.

Reserva de Derechos

La presente edición electrónica de las Memorias del *Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)* incluye trabajos pertenecientes a diversas áreas del conocimiento, entre las que se encuentran: Ingeniería Electrónica, Ciencias Computacionales, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecatrónica, Ciencias de la Ingeniería y otras disciplinas afines dentro del ámbito de la ingeniería.

Cubriendo las siguientes áreas prioritarias nacionales:

- Cambio Climático
- Economía Circular
- Desarrollo Sostenible
- Educación y Cultura
- Electromovilidad
- Inteligencia Artificial
- Tecnología 5.0 y Ciencias de Datos
- Sistemas Socioecológicos
- Vivienda
- Sistemas agroalimentarios sustentables
- Salud
- Gestión del Agua
- Eficiencia Energética / Energías Renovables
- Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes

Los autores que participan en esta publicación han otorgado su consentimiento expreso al Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) para la difusión de sus contribuciones en esta memoria electrónica, correspondiente al CITCA, celebrado del 26 al 28 de noviembre de 2025.

Asimismo, los autores declaran que los trabajos presentados son originales, producto de su autoría, y que no infringen derechos de terceros. Asumen plena responsabilidad por el contenido, veracidad y originalidad de los mismos, deslindando de toda responsabilidad legal, ética o académica al comité editorial de esta memoria.

Derechos Reservados

Diciembre de 2025

Memorias del Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)

© Tecnológico Nacional de México

Avenida Universidad No. 1200, 5° piso, Colonia Xoco, Alcaldía Benito Juárez

C.P. 03330, Ciudad de México, México

Todos los derechos reservados. Las opiniones, análisis y resultados expresados en los trabajos aquí reunidos son responsabilidad exclusiva de sus respectivos autores y no reflejan necesariamente la postura institucional del TecNM o del CENIDET.

Se autoriza la reproducción parcial o total del contenido incluido en esta memoria, siempre que se cite adecuadamente la fuente y que dicha reproducción tenga fines estrictamente académicos y no lucrativos.

MEMORIA DEL

5TO CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA, 2025

Avances en investigación y desarrollo tecnológico

MESA DIRECTIVA

Lic. Lorenzo Octavio Hernández Robles Arenas

Director de CENIDET

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Subdirectora de Servicios Administrativos del CENIDET

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Subdirector Académico del CENIDET

CP. Erika Yaneli Bahena Flores

Subdirectora de Planeación y Vinculación del CENIDET

Dr. Jarniel García Morales

Jefe de Departamento de Ingeniería Electrónica del CENIDET

Dr. Manuel Adam Medina

Organización General del CITCA

Comité editorial

Editora General

Dra. Marisol Cervantes Bobadilla

Editor General

Dr. Jarniel García Morales

Editores Asociados

Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda

Dr. Juan Gabriel González Serna

Dr. Erik Rosado Tamariz

Dra. Luisana Claudio Pachecano

Dr. Jesus Darío Mina Antonio

Dra. Mónica Borunda Pacheco

Mtra. Daniela Hernández Castañeda

Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez

Dr. Vicente Borja Jaimes

Conferencias Magistrales

Dr. Edgardo de Jesús Carrera Avendaño

Programa de Talleres

Dr. Vitervo López Caballero

Sistema WEB

Comité arbitraje

Abisai Acevedo Quiroz
Adriana Mexicano Santoyo
Alberto Armando Alvarez Gallegos
Alejandra Guadalupe Silva Trujillo
Alfredo De La Barrera González
Alfredo Terrazas Porcayo
Amira Del Carmen Dagnino Olivas
Andres Blanco Ortega
Andres Carmona Hernandez
Angel Tlatelpa Becerro
Angelica Monserrat Velazquez Hernandez
Antonio Juan Capistran Abundez
Antonio Priego Clemente
Araceli Ávila Hernández
Areli Soledad Ruiz Martinez
Ariadna Colette Perpuli Ceseña
Aristides Caballero Alfaro
Arturo Abúndez Pliego
Arturo Abúndez Pliego
Arturo Javier Martinez Mata
Atoany Nazareth Fierro Radilla
Blanca Dina Valenzuela Robles
Blanca Lucero Xopo Rodríguez
Brissa Angélica Burgos Sánchez
Carlos Manuel Lara Barrios
Carlos Miguel Jimenez Xaman
Catalina Del Socorro Vidal Cornelio
Cesar Humberto Guzman Valdivia
Claudia Carolina Lacruhy Enríquez
Claudia Cortés García
Cornelio Morales Morales
Cristina Blanco Gonzalez
Cruz Ernesto Aguilar Rodriguez
Cuitlahuac Gonzalez Panzo
Cynthia Wong Arguelles
Daniel Angeles Herrera
Daniela Hernandez Castañeda
Dante Mújica-Vargas
Demetrio Perez Vigueras
Denisse Brenda Hernández Barba
Diana Gabriela Garcia Malvaez
Eddie Helbert Clemente Torres
Edgar Rafael Hernandez Rios
Edgar Rafael Hernandez Rios
Edgardo De Jesús Carrera Avendaño
Eduardo Javier Cortes Zetina
Edwin Rodríguez Hernández
Elias Neftali Escobar Gomez
Eliel Rafael Romero García
Elizabeth Valdes Rincon
Elizabeth Valdés Rincón
Elizabeth Valdés Rincón
Elizabeth Valdés Rincón
Elsy Maria Rosales Uc
Enrique Alcudia Zacarias
Enrique De Jesús Moreno Carpintero
Enrique Quintero Mármol Márquez
Erick Del Jesus Tamayo Loeza
Ericka Maldonado Pesina
Erik Rosado Tamariz
Erika Haydee Rubio Camara
Ernesto Alonso Ocaña Valenzuela
Esther Lugo González
Ezequiel Dominguez Lagunas
Felipe Noh Pat
Fernando Diaz Hernandez
Fredy Juárez Pérez
Gabriela Hernández Luna
Gabriela Pineda Chacon
Gianny Melina Cancino Méndez
Gildardo Godinez Garrido
Giner Alor Hernandez
Gloria Lilia Osorio Gordillo
Guadalupe Martinez Vichel
Héctor Miguel Buenabad Arias
Héctor Ramón Azcaray Rivera
Hugo Estrada Esquivel
Iris Lizeth Hernandez Solis
Irving Metelin Rosado
Irving Osiris Hernandez Lopez
Isaac Justine Canela Sánchez
Isay Obet Huicochea Rios
Israel Isaac Zetina Rios
Ivan Alberto Guillen Cancino
Iván Alcalá Barojas
Ivan Antonio Juarez Trujillo
Ivan Erick Aguilar Castillo
Ivetteh Virginia Medina Medina
Jarniel García Morales
Javier Ortiz Hernández
Javier Uriarte Flores
Jessica Beltrán Márquez
Jessica Martinez Gomez
Jesus Chavez Galan
Jesús Darío Mina Antonio
Jesus Emmanuel Solis Perez
Jesús García Blancas
Jonny Paul Zavala De Paz
Jorge Alberto Fuentes Pacheco
Jorge Aurelio Brizuela Mendoza
Jorge Bedolla Hernández
Jorge Cein Villanueva Guzman
Jorge Colín Ocampo
Jorge Edmundo Mastache Mastache
Jorge Luis Barahona Avalos
Jorge Misael Ruiz Martínez
Jorge Yusef Colín Castillo
Jose Alfredo Hernandez Perez
José Guadalupe De La Cruz Morales
Jose Hugo Arellano Perez
José Isidro Hernández Vega
Jose Luis Saldivar Garza
Juan Belisario Ibarra De La Garza
Juan Carlos Gonzalez Islas
Juan Carlos Rojas Pérez
Juan Gabriel Gonzalez Serna
Juan Gabriel Gonzalez Serna
Julia Patricia Melo Morin
Julia Yazmín Arana Llanes
Julio Cesar Gonzalez Juarez
Karime Baltazar Alcaraz
Karina Delgado Osorio
Kevin Edson Petatan Bahena
Kristian Freyri Maya Gress
Laura Adriana Galicia Galicia
Laura Iveth Catalán Godínez
Laura Vidal Reyes
Lenin Ramos Cantú
Lorena Elizabeth Balandra Aguilar
Luis Carlos Valenzuela Soqui
Luis Enrique Calatayud Velázquez
Luis Enrique Villagomez Guerrero
Luis Felipe Rivas Mendoza
Luis Guillermo Carreto Hernández
Luis Manuel Garcia Martinez
Luis Mauricio Carrillo Santos
Luis Raymundo Aran Sanchez
Luisana Claudio Pachecano
Ma. Del Carmen Toledo Pérez
Macdiel Emilio Acevedo Quiroz
Madain Perez Patricio
Manuel Adam Medina
Manuel Alejandro Ojeda Misses
Manuel Arias Montiel
Manuel De Jesús Palacios Gallegos
María Del Rocío Ochoa Montiel
María Fernanda De Jesús Ramírez
María Guadalupe Beltrán Lizárraga
Mariana Gisela Peña Juarez
Marianda Del Rocio Sanchez Diaz
Mario Jose Romellon Cerino
Mario Ponce Silva
Marisol Cervantes Bobadilla
Matilde Reyes Fuentes
Máximo López Sánchez
Miguel Alberto Domínguez Gurría
Miguel Alvarado Flores
Miguel Angel Chagolla Aranda
Miguel Ángel Ché Pan
Miguel Angel Ruiz Jaimes
Miguel Angel Zuniga Garcia
Miriam Antonia Chavarria Santibañez
Miriam Navarrete Procopio
Mónica Borunda Pacheco
Nayeli Del Milagro Hernandez Barba
Neli Gomez Gallegos
Noel Garcia Diaz
Omar Arturo Domínguez Ramírez
Omar Rodriguez Benitez
Orlando Montoya Márquez
Oscar Mario Rodríguez Elias
Paola Andrea Niño Suarez
Paulina Escalante Ramírez
Pedro Cruz Alcantar
Raquel Sotelo Urueta
Raúl Pinto Elías
René Santaolaya Salgado
Ricardo Eliu Lozoya Ponce
Ricardo Gutiérrez Feria
Ricardo Valera Velázquez
Roberto Alvarado Juarez
Rocío Ramos Hernández
Rodolfo Amalio Vargas Mendez
Roger Alejandro Cundapi Arroyo
Sagrario Martínez Ruíz
Samanta López Salazar
Samuel Rene
Sandra Eloísa Rangel Estrada
Susana Silva Martínez
Vicente Borja Jaimes
Víctor Josue Ruiz Martínez
Victor Manuel Ambriz Diaz
Victor Manuel Zezatti Flores
Victor Miguel Salinas Cortés
Virna Viridiana Vela Rincon
Vitervo López Caballero
Wendy Netzy Hernández Díaz
Yadira Toledo Navarro
Yesenia Reyes Severiano
Yessenia Olazo Gomez
Yvonne Chávez Chena

Comité organizador estudiantil

Responsables del comité organizador estudiantil

Laura Elena Hernández Pardiñas
Arturo Daniel Espinosa Pedroza
Héctor Alonso Quiroz
Jonathan Arenas Robles
Isay Obed Huicochea Ríos

Comité organizador estudiantil

Hector Armando Morales Carriles
Hussein Antonio Peña Colli
Jesus Asael Dominguez Cortes
Johanna Xitlally Ochoa Tenorio
José Alan Zamora Valdez
Lázaro Alberto Rodriguez Loza
Luis Enrique Calatayud Velazquez
Maria De Los Angeles Ramirez Macario
Maria Del Carmen Acuña Olivos
Octavio Jesus Salazar Mojica
Santiago Fabrizzio De Jesús Ocampo Vergara
Sergio Elizalde Beltrán
Emiliano Peña Chang
Alfredo Gutiérrez Alarcón
Alvaro Leonel Hernandez Bello
Laura Adriana Galicia Galicia
Ana Kary González Ramos
Edgar Gerardo Sotelo Parra
Leila Montserrat Coyote
Angel Alfredo Aguilar
Carlos Alberto Sosa Narváez
Carlos Flores Martinez
Erick Galicia Vargas
Fernando Espinoza Rosas
Jefferson E. Martinez
José Carrasco Garcia
José Erick Lozano
Leonardo Javier Rios Chávez
Leyanet Beatriz Álvarez
Daniela Yuque Pla
Luis Fernando Bustos
Marifer Jiménez Luna
Antonio Juan Capistran Abundez
Daniel Hernández Ramírez
Hugo Coello Sánchez
Yessenia Díaz Álvarez
Tania Itzel Ibarra Flores
William Flores Gomez
Monica cristal Giron Colin
Oswaldo Aparicio Rodríguez
Salvador Elí Durán Morales
Ivan Bonifacio Hernández Hurtado
Karen Yanine Román Miranda
Luis Alberto Orihuela Martinez

Moderadores

Rafael Campos Amezcua
Andrés Blanco Ortega
Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Abisai Acevedo Quiroz
Noé Alejandro Castro Sánchez
Edgardo de Jesús Carrera Avendaño
Erik Rosado Tamariz
Víctor Hugo Olivares Peregrino
Rosa Olivia Maquinay Díaz
Yvonne Chávez Chena
Hugo Estrada Esquivel
Gloria Lilia Osorio Gordillo
Miguel Ángel Chagolla Aranda
Juan Carlos Rojas Pérez
Eladio Martínez Rayón
Andrea Magadán Salazar
Blanca Dina Valenzuela Robles
Claudia Cortés García
Marisol Cervantes Bobadilla
Ivan Antonio Juárez Trujillo
Juan Reyes Reyes
Jarniel García Morales
Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Yesenia Reyes Severiano
Karime Baltazar Alcaraz
Daniela Hernández Castañeda
Juan Reyes Reyes
Eddie Helbert Clemente Torres
Víctor Josué Ruiz Martínez
Enrique Alcudia Zacarías
Heriberto Adamas Pérez
María Yasmín Hernández Pérez
Jesús Darío Mina Antonio
Alicia Martínez Rebollar
Roger Alejandro Cundapí Arroyo
Luis Mauricio Carrillo Santos
Luisana Claudio Pachecano

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. ARTÍCULOS

Antimicrobial Resistance in Bacteria Isolated from Clinical and Environmental amples in Zacatepec, Morelos: A Documentary Analysis 2
Torres Salgado Madelein.

A Preliminary System for Sound and Environmental Monitoring in Beehives Using LoRa Transmission 6
Juan Antonio Villa Guerrero, Celina Lizeth Castañeda Miranda, Mireya Moreno Lucio, Luis Octavio Solís Sánchez, Ma. Del Rosario Martínez Blanco, Héctor Alonso Guerrero Osuna.

A Review on the Impact of Materials on the Mechanical Performance of Energy-Storing-and-Returning (ESR) Foot Prostheses 12
Sandra Yaraset Vara Salas, Enrique Alcudia Zacarias, Juan Antonio Paz González, Juan Antonio Ruiz Ochoa.

Detection of the Varroa Destructor Mite through Computer Vision in Apis Mellifera 18
Daniel Mauricio Matías García, Mireya Moreno Lucio, Celina Lizeth Castañeda-Miranda, Luis Octavio Solis-Sánchez, Luis Eduardo Bañuelos García, Carlos Alberto Olvera-Olvera.

Experimental Evaluation of Recycled-Rubber-Modified Asphalt Mixtures for Sustainable Pavements 24
Amador Martínez María de Lourdes.

Identification of Natural Enemies of Diaphorina citri in Citrus Fruits 30
Hernández Hernández Eder Yosmar, San Juan Martínez Alberta, Casanova Pérez Lorena, García Alonso Florencia.

Implementation of an Automated Integrated Waste Extraction and Lubrication System for CNC Machines 34
Rosas García José Yahir, García Enríquez Irma Josefina, Bautista Bautista Alberto Nicolás, Ávila Martínez Carlos Enrique, Núñez Dorantes Juan Carlos, Malagón González Fernando.

Redesign and Construction of a Multifunctional Reactor for Biofuel Production 40
Vazquez Maceda Sandro, Acevedo Quiroz Abisai, Adam Medina Manuel, Cervantes Bobadilla Marisol, García Morales Jarniel

Solar photovoltaic pumping as an alternative to grid extension: A case study in the Mixteca Poblana 44
Galicia Vargas Erick, González Ortega Alfredo, Aguayo Alquicira Jesús

Study of Expired Medications as Copper Corrosion Inhibitors 50
E.J. Moreno Carpintero, R. López Sesenes, M.A. Chagolla-Aranda, H. Coello-Sánchez, E. Vázquez-Altamirano, S. Martínez-López.

Trends in New Manufacturing Methods for Sandwich Structures and their Influence on Mechanical Properties 54
Luis Alberto Orihuela Martinez, Enrique Alcudia Zacarias, Juan Antonio Paz González, Oscar Adrián Morales Contreras

Business Sales Forecasting Model Using Regularized Linear Regression and Temporal Validation 60
Angel Maximiliano Arenas Muñiz, Dante Mújica Vargas, Andrés Antonio Arenas Muñiz

Energy Utilization of Coffee Residual Biomass: Development and Evaluation of a Pellet Burner for Drying Processes 65
Arly Dario Rincon Quintero, Omar Lengerke, Camilo Leonardo Sandoval Rodriguez.

From Outsourcing to Cooperative Industrial Systems: Bayesian Modeling and Monte Carlo Simulation for Sustainable Production Networks 72
Espinoza Huerta Tlaloc Daniel, De la Torre Gea Guillermo.

AquaGuard: An Interactive Website on the Quality of Surface Water Bodies in Mexico 78
Guadalupe Salas López, Esteban Valente Arenas, Hector Gerardo Pliego Lugo, Jesús Enrique Serrano López

Flight Envelope Calculation for Low-Speed Aircraft 84
Diaz del Castillo Cabrera Azael Ruben, Alvarado Jiménez Ian Yaocelotl, Jiménez Ponce Luis Antonio

Mechanical Behavior Analysis of a Composite Material Under Tensile Load: Simulation vs. Experimental Test 88
Álvarez González Fátima Jocelyn, García Granados Claudia Mariana, Guardian Acosta Christian Alejandro, Lazarin Leaño José Manuel.

Tecnogol: Fostering Ethics, Teamwork, and Love for Engineering through Competitive Robotics 94
Marín Amaya Mónica Graciela, Guerrero Ávila Yasmín, Macías de la Torre Armando, Limones Gómez Grecia Daniela, Cortés Reyes Brayan Guadalupe, Moreno Álvarez Lúar.

Advances in Hybrid Wind-Solar Photovoltaic Systems: A Short Review 98
López Barreto AndreaAlejandra, García Morales Jarniel, Reyes Reyes Juan, Cervantes Bobadilla Marisol, Astorga Zaragoza Carlos-Manuel.

A Unified Analytical Framework for the Preliminary Design of Small-Scale Archimedes Screw Turbines 103
Aguilar Alvarez Angel Alfredo, Carrasco García José, RosadoTamariz Erik, Chagolla Aranda Miguel Angel.

Design and Evaluation of a Low-Cost Solar Still for Water Purification 109
Sánchez Álvarez J. S., Demesa López F.N., Gutiérrez González E., Serrano Arellano J.

Development of a Solar Trajectory Tracking Algorithm in FPGA for a 265 W Photovoltaic Panel 115
Aguilar Anastacio J. Carlos, Martinez Moreno Francisco, Enciso Contreras Ernesto

Enhancing Torque Generation in an In-pipe Savonius Turbine Using an Eye-shaped Flow Deflector: A CFD Study 121
Carrasco García José, Rosado-Tamariz Erik

Exploration of Chaotic SPWM in Reconfigurable Systems: From Logistic Map to THD Analysis 127
Ochoa Sáenz Hiram, Lozoya Ponce Ricardo Eliu, Martínez Montejano Roberto Carlos, Ontañon García Luis Javier, Jiménez López Eduardo .

High-efficiency resonant DCX transformer DC-DC converter 133
Vázquez Albarrán Emiliano, Aguilar Castillo Carlos, de León Aldaco Susana Estefany.

Implementation of an Observer for Fault Detection in Permanent Magnet Synchronous Motor 138
Cantoriano Diego Edilberto

Optimization of a solar heater with integrated reflective mirrors 142
Reyes Alonso Gonzalo, Estrada Cruz Edgar, Barrera González, Ismael

Peltier cell for generating energy using passive sources of cold and heat 147

ÍNDICE

Aparicio Rodríguez Oswaldo, González Ortega Alfredo , Aguayo Alquicira Jesús

Portable Power Prototype Powered by Solar or Wind Energy 153
Ortiz Lagunas Gabriela Yalit, Hernández López M. I., Rodríguez Hernández Juan David, Serrano-Arellano J.

Solar Irradiance Estimation using Extended Kalman Filter: Application in Chicoloapan, Mexico 159
Rojas Michael, Ramos García Fernanda, Sanchez Reyes Luz Elena, Hernandez Rivera Daniel, Hernandez Juarez Brenda Beatriz, Lopez Castro Eduardo.

Statistical Analysis of Precipitation and Electricity Demand in the Eastern Regional Control Management (GCRO) 165
Alejandro Alvarez Organista, Mónica Borunda Pacheco, Carlos Daniel García Beltrán, Manuel Adam Medina.

Battery Pack Sizing and Configuration for an Electric Formula SAE Vehicle 171
Camacho Guevara Melchor Alejandro, Davila De La Peña Rene Reiyel, Rosado Tamariz Erik, Campos Amezcua Rafael.

Design and Implementation of a Low-Cost LIN Bus Automotive Controller 177
Solís Rayas Marisol del Rocío, Muñoz Moreno Gilberto, Juárez Balderas Mario Alberto, López Núñez Adolfo Rafael.

Integrated Methodology for the Design and Topological Optimization of an Upright for an FSAE Electric Vehicle 182
Davila De La Peña Rene Reiyel, Camacho Guevara Melchor Alejandro, Rosado Tamariz Erik, Campos Amezcua Rafael.

The interface for the Smart System for Measurement and Optimization of the Charge and Discharge of Electric Vehicle Battery Packs 188
José de Jesús Alcalá Platas, Omar Barragán Pérez, Edgar Roberto Sandoval García, Edgar Omar Curiel Anaya.

Design of an Automated Intelligent Irrigation System for a Persian Lime Agricultural Field 194
Osorio Sánchez Yutzil, Bautista Bautista Alberto, Ávila Martínez Carlos, García Enríquez Irma, Galván Chávez Jorge, Navarrete Hernández Gabriel.

Embedded System for Automatic Monitoring of Water TDS Using a Microcontroller and Graphical User Interface 200
Sánchez Coronado Eduardo Mael, Rodríguez Jarquin José Pastor, Bertani Hernández David, León Reyes Arnulfo, García Puga Cecilia Elizabeth, Pimentel Suvilla Eduardo.

Fiber Optic Temperature Sensor Based on PDMS End-Capped Michelson Interferometer for Water Monitoring 205
Picos Lopez Miriam Elizabeth, Lopez Cortes Daniel, Ruiz Pérez Víctor Iván, Pérez García Gilbert Francis, Flores Rosas Ariel, Escalante-Zarate Luis.

Sustainable Water Management in Denim Laundries: Initial Field Evidence in Tehuacán, Puebla 210
Pérez Hernández Omar, Araoz Baltazar Iván, Martínez Zarate Israel, Araoz Baltazar Ángel, Del Ángel Medina Oscar, Granados Sánchez Angélica.

Study and Design of a Prototype Solar Still for Saline Water Using Aluminum and CPVC 215
González Torres K. E., Medina García S., Demesa López F.N., Serrano-Arellano J.

System For Obtaining Water Contained in the Air 220
Vargas Beltran A., Rodríguez Gómez Y.C., Medina-García S., Serrano-Arellano J.

An approach to intelligent packaging selection using computer vision 225
Fragoso Mandujano José Armando, Luna Aguilar Noé Moisés, Pérez Garcia Gilbert Francis, Pérez Pérez Esvan de Jesus, Urbina Brito Norberto, García Espinoza Victor Hugo.

Application of Artificial Intelligence and Gamification in the Process of Selection of University Scholar Candidates 230
Girón Colín Mónica Cristal, Hernández Castañeda Daniela, Gómez Aguilar José Francisco.

Artificial Intelligence Applied To Absorption Heat Pumps 235
Manríquez Pardo Gerardo, Hernández Pérez José Alfredo, Gómez Aguilar José Francisco, Huicochea Rodríguez Armando, Parrales Bahena Arianna, Solís Pérez Jesús Emmanuel.

Assessing self-regulated learning using cluster analysis applied to MSLQ data in higher education 241
Miguel Ángel Couoh Novelo, María Yasmín Hernández Pérez, Javier Ortíz Hernández.

Binocular CNN for Webcam Gaze Tracking: A Two-Protocol Comparison against Single-Eye (9-Point Calibration & Blue-Ball Trajectory) 245
Urquiza Martínez Joel, González Serna Gabriel, Magadan Salazar Andrea, González Franco Nimrod, Villanueva Tavira Jonathan.

Challenges in the Construction of a Dataset for Urban Wind Speed Forecasting 251
Flores Gómez William, Claudio Pachecano Luisana, Estrada Esquivel Hugo, Martínez Rebollar Alicia.

Comparative Analysis between Traditional Approaches and Neural Networks in Human Action Recognition 256
Arce Serrano Mariana, Pinto Elías Raúl, Villanueva Tavira Jonathan, Magadán Salazar Andrea, Fuentes Pacheco Jorge Alberto.

Imbalance Detection in Rotating Machines Using Machine Learning and Cepstral Analysis 262
Sandoval Rodriguez Camilo Leonardo, Rincon Quintero Arly Dario, Lengerke Omar.

Neural Network-Based Model for Citrus Fruit Quality Classification on Single-Board Computers 268
Cantú-Castro Angel Dagoberto, Polanco Martagón Said, Hernández Mier Yahir, Nuño Maganda Marco Aurelio.

Active Monitoring with Honey for Diabetic Foot Regeneration 273
Eguia Luis, Sánchez Guillermina, Linzaga Elizabeth.

Additive Technology in the Manufacture of Prostheses for Dog Hind Limbs 277
Delgado Rodríguez José Julián, Castañeda de Jesús Kenya Mayumi, Galicia Amayo Araceli, Carreón Sosa María José, Huerta Clímaco Diana Paola.

A Low-Power Band-Pass Filter suitable for ECG/EMG signals 283
Rangel Jimenez Orlando, Fernandez Martinez Joselyn, Cisneros Sinencio Luis, Diaz Sanchez Alejandro.

Classification of Emg Signals Using Neural Networks in the Activation of the Biceps Brachii Muscle 288
Herrera Ramírez Misraim, Hernández Gonzaga Brenda, Celis Petla Daniel, Namigtle Jiménez Alfredo.

ÍNDICE

Design and Virtual Validation of a Continuous Passive Motion Mechanism for Ankle Rehabilitation Based on Lissajous Curves 294
Guzmán Valdivia Cesar Humberto, Guzmán Valdivia Brenda Mireya, Blanco Ortega Andrés, Rosado Tamariz Erik, Brizuela Mendoza Jorge Aurelio.

Development of a Multifunctional Wheelchair to Support Patient Transfer and Rehabilitation 300
Ventura Martínez Yesica, Jiménez González Gerardo, Santiago Rojas Viviana Alondra, Cruz Raymundo María Isabel, Castillo Quiroz Gregorio.

Electronic Radioactive Source Simulator as a Tool for Teaching Nuclear Physics 305
Georgina Hernández Santiz, Adriana Jackeline Hernández Carbajal, Abigail Peláez Segura, Christian Roberto Ibáñez Nangüelú

Electronic System for Treating Sarcopenia 310
Ortiz Flores Víctor Hugo, Robles Becerra Alexis, González Morales Víctor Alfredo, Higuera González Rogelio Manuel.

Hand Prototype For Catheterization Practice Of Nursing Students 315
Ochoa Vázquez Itzel Michelle, Maldonado León Rocío Demetria, Soberanes Martin Anabelem.

Manipulation of InMoov-Based Prosthesis by Myoelectrical Signals 319
Arriaga Criollo Donaldo, Flores de la Llave Juliette, Vázquez Ortega Guillermo Antonio, Vivanco Castañeda Didiher

Mechanical Percussion Device for the Prevention of Myofascial Syndrome in the Back in Patients 324
Barragán Méndez, José María, Reyes Muñoz, María Fernanda, Valerio Aldama, Sinaí

Overexpression of Human Cystatin C in E. Coli and its Purification: Strategies to Remove Nucleic Acid Contamination 330
Francisco Reyes Espinosa, L. Irais Vera Robles, A. Hernández Arana, A. Arroyo Reyna, and R. A. Zubillaga

Portable Device with Oxygenation and Temperature Sensors for Monitoring Respiratory Diseases 335
Marquez García Hannia, Osorio Altamirano Kevin, Fernández Remigio Mari, López Nájera María, Escobedo Martínez Irving

Pressure Ulcer Prevention With 3D Printing Technology Works Biocompatible Materials In Lattice Estructure 341
Saucedo Bocanegra Victor Miguel

Processing of Electromyographic Signals in Lower Limbs of Patients with Some Degree of Spasticity 347
Chávez Báez Marco Vinicio, Morales Colorado José Luis, Pérez Juárez Erik, García Ramírez María del Carmen, Fraga Aguilar Miguel Angel, Morales Cervantes Antony

Prototype of a Wearable Device for Monitoring Oxygenation and Heart Rate in Patients 353
Serapio Moro Guadalupe Azucena, Pérez Castañeda Oscar Leopoldo, López Clemente Sinaí Guadalupe, Torres Hernández Andrea, Varillas Sánchez Bryan Gustavo

Prototype Development and Pilot Study for Non-Invasive Postprandial Glucose Measurement Using Multicolor Optical Transmission in Dried Saliva Samples with KNN-Based Classification 358
Sanchez Brito Miguel, Sanchez Monroy Virginia.

Security System for Medical Imaging Based on Digital Steganography and Biometrics 364
Nuñez Ramirez Diana, Sánchez Díaz Aimee Amalinalli, Reyes Gordillo Jonathan Daniel, Ruiz Gasca Marco Antonio, Cedillo Hernández Manuel.

Software Development for External Breast Prostheses 369
Pérez Frías Mario Adán, Gutiérrez Carrillo Rubén Alejandro, De la O Rodríguez Pedro, Rodríguez Juárez Pedro, Moreno Chávez Gamaliel, Burnes Rudecino Susana

Real-time Mexican Sign Language Digital Interpreter for Healthcare 375
González Montalvo D.C., Galicia Méndez M.E., Hernández Cortés E., Rojas-Aragón J.M, Granados Sánchez A.

Review of Noninvasive Techniques for the Early Detection of Cognitive Impairment in Older Adults 380
Alvares González Martha Betsabé, Astorga Zaragoza Carlos Manuel, Ramírez Rasgado Felipe, Martínez Vázquez Daniel Librado, Hernández González, Omar

VitalFall: Biomedical Wearable Physiological Monitoring, Fall Detection and Stress Status 385
Jiménez Frías Dana Débora, Mirón Arcos Itzel Romina, Mendoza Soriano Valeria.

Wearable Plethysmograph Design 390
Hernandez Banda Jorge Eduardo, Osorio Vega Lizeth Viridiana, Solano Vargas José Alberto.

AVISENS – Development of a Real-Time Monitoring System for Environmental Variables in Laying Hens 396
Santos Bravo Monserrat Aimeé, Márquez Gutiérrez Natalia Esther, Guevara Hernández Jason Daniel

Design and Development of a Robot for Measuring and Monitoring Air Quality in Confined Spaces 402
León Sangabriel María Guadalupe, Reyes Fernández Miriam Cristina, Sánchez Medel Luis Humberto, Posada-Gómez, Rubén.

Design and Validation of a High-Resolution Image Capture System for Focus Stacking of Agricultural Plant Leaf Images 407
Modesto Medina Melendrez, Diana Karina Jacobo Rubio, Juan Carlos González Nava.

Direct vs. Progressive Learning Transfer: A Comparative Analysis of Robustness and Accuracy in Lightweight Architectures for Corn Leaf Disease Classification 412
Villalobos Uribe Luis F., Reveles Gómez Luis C., Sifuentes Gallardo C., Serrano Talamantes José F.

Early morphometric response of potato inoculated with Rhizobium sp. ACO-34A under saline stress: a sustainable biofertilization approach 418
Sarmiento Megchum Erick Fabián, Solís Zebadúa Stephanie, Rincón Rosales Reiner, Rincón Molina Clara Ivette, Manzano Gómez Luis Alberto, Maldonado Gómez Julio César.

Earthtics, Prototype Design with Npk Sensor for Measuring Nutrients and Soil Parameters. 423
Vela Peraza Andrea Guadalupe, Alpuche Bote Edgar Ediel, Lopez May Carlos Humberto.

Environmental Sustainability-Agronomic Indicators of Indoor Crops in Urban Agriculture 428
Jorge Flores Velázquez, Francisco García Herrera.

From Productivity to Sustainability: Coffee Cluster Development in the Sierra Negra of Puebla 433

ÍNDICE

Villafuerte Palavicini Faustino Sergio, Cruz Manzo Jessica, Guevara Ramírez Iniria, Ruan Cervantes José Luis, Marín Beltrán Magda Elizabeth, Vázquez León Lucio Abel.

Fuzzy Logic Model for Evaluating Water Quality in Nile Tilapia Aquaculture Ponds 439
Padilla Carrillo Carlos Ivan, Verduzco Ramírez Jesús Alberto, García Virgen Juan, Ruíz Tadeo Ana Claudia, Reyes Mendoza Oscar Fabián, García Díaz Noel.

Initial Growth of Carrot (Daucus Carota L.) in Response to Biofertilization with Rhizobium 445
Solís Zebadúa Stephanie, Sarmiento Megchum Erick Fabián, Rincón Rosales Reiner, Rincón Molina Clara Ivette, Manzano Gómez Luis Alberto, Gen Jiménez Adriana.

NDVIcam: A multispectral camera for obtaining the NDVI index and Nitrogen levels in plants illuminated by LEDs 451
Luis A. Gama Moreno, Mayra I. Montero Cortes, Violeta H. Plazola Soltero, Christian G. Murguia Vadillo, J. Angel Torres Rangel, Alvaro A. Ortiz-Garcia

Postharvest Efficiency and Cup Quality of Marsellesa Coffee Under Traditional Processing in Sierra Mixe, Oaxaca 456
José Uriel GarcíaDomínguez, Yuri Villegas Aparicio, Carlos Francisco Varapizuela Sánchez, Aarón Martínez Gutiérrez, Vicente Arturo Velasco Velasco, Gustavo Omar Díaz Zorrilla.

ADAS Systems Prototyping: Distributed Architecture with eCAL Implemented on Raspberry Pi 461
Cárdenas Regalado Jaqueline, Morales Lira Omar, González Pérez Jose Luis, González Huitrón Víctor Alejandro, Rodríguez Mata Abraham Efraim.

Analysis of SSH Service Logs for the Detection and Prevention of Cyberattacks and Unauthorized Access 465
González Hernández Jorge Luis, Valtiérrez Angel David Arnoldo, Vázquez Tiscareño, Raúl, Acosta Armendáriz Cesar Adán, Nevárez Fierro Cesar Jesús, Fierro Villarreal Victorina.

Artificial Intelligence for Food Security and Agricultural Sustainability. Review 472
Tobón Villalva Alfredo Nabor, González Lorence Armida, Espinosa Calderón Alejandro, Morales Morales Cornelio, Mondragón Solís Ana Luisa.

Dynamic Evaluation of Anaerobic Digestion Using the Reduced ADM1-R4 Model 478
Rodas Citalán Josué, Ruiz Maldonado José Luis, Flores Estrella René Alejandro.

Fragmentation of Large-Scale Medical Databases: Scoping Review and Architecture 483
Barroso García Jhonatan, Rodríguez Mazahua Lisbeth, Castro Medina Felipe, Alor Hernández Giner, Juárez Martínez Ulises.

From Industry 4.0 to 5.0: Key Factors Influencing Automation in Distribution Centers 489
Ceja Silva Edna Gabriela, Soto Leyva Yasmín.

Simulation of Secure Mobile Robot Communications Using QKD (Hotspot and Mobile Relay Architectures) 493
Hernandez Barreto Alan Daleth, Velasco Campos Maria Fernanda, Morales Escobar Karol Yenaro, Diaz Dominguez Arturo Emmanuel.

Educational Prototype For Electrocardiogram Signal Processing Using ESP32 And LabVIEW 499
Rivera Méndez Bianca Adamaris, Morales Dolores Abigail, Mejía Arellano Daniela.

Caracterización De Microplásticos A Partir De Caucho Degradado Para Su Mitigación En Un Ciclón Tipo Stairmand. 505
Cecilia Ortiz Alvarez, Esperanza Rodríguez Morales, Ana Laura Martínez Hernández, Yadira Guadalupe Maldonado.

Optimización y Evaluación de Fotocatalizadores de Óxido de Zinc para la Degradación de Azul de Metileno 506
Martínez Sánchez Estefanía, Cruz Santiago Lorenzo Antonio, Portales Martínez Benjamín.

Estudio Teórico Del 1-Butil-3-Metilimidazolio Funcionalizado Con Aminoácidos Para Captura De CO2 507
Oswaldo Artury Gutiérrez Gámez, Hugo Alberto Velasco Ocejo, Ana Cristina Ramírez Gallardo, Isidoro García Cruz, Leonor Angelica Guerrero Zuñiga, Diana Lucía Campa Guevara

Aislamiento y Caracterizacion Morfologica de Micorrizas Ericoides en Especies de la Familia Ericaceae 508
Esquivel Arroyo Ricardo, Zepeda Guzman Santos.

Evaluación de la Actividad Antifúngica e Inhibición de la Producción de Esporas de Especies de la Familia Asteraceae 509
Alexei González Arizmendi, Alfredo Quinto Hernández, José Francisco Carpio Pineda, Macdiel Acevedo Quiroz.

Evaluación del Efecto Aglutinante de Nanocristales de Celulosa en Pastillas de Carbón Activado 510
Torres Hernández Carlos, Castro Guerrero Carlos Fernando, Morales Cepeda Ana Beatriz

Kinder360 - Herramienta para docentes 511
José Jesús Everardo Pérez Salazar, María Guadalupe Amézquita Delgado

Dispositivo con Películas Delgadas de 1D-TiO2 con Puntos Cuánticos de CdS para la Producción de Hidrógeno 512
Luis Antonio García Contreras, Rafael G. Suárez Nájera, Mario Rodríguez Varela, José O. Flores Flores, Rodolfo Zanella Specia, Roberto Y. Sato Berrú, José A. Chávez Carvaya

Evaluación de la Capacitancia de un Carbón Activado 513
Carlos F. Castro Guerrero, Ana B. Morales Cepeda, Carlos Torres Hernández, Ulises León Silva, Jesús Escobedo-Alatorre.

Evaluación de MCF Mediante Curvas de Polarización, Comparación de Técnicas (Potenciometro Vs Manual). 514
Israel de Jesús López Muñoz, Claudia Karina Zagal Padilla, Alberto Armando Álvarez Gallegos.

Control neuronal con zona muerta y saturación para un MRM 515
Raúl Alegría Gómez, Manuel Adam Medina, Jarniel García Morales, Arturo Daniel Espinosa Pedroza

Minimización de la Capacitancia del Dc-Link en Motores de Inducción 516
Luis Mauricio Carrillo Santos, Yesenia Reyes Severiano, Mario Ponce Silva, Víctor Hugo Olivares Peregrino.

Sistema de micromedición de agua para viviendas basado en IoT 517
Estefanía Gordillo Hernández, Rodolfo Zola García Lozano

AI-explainable predictive model to mitigate student dropout at TecNM 518
Yen Ventura González, Dr. Vitervo López Caballero

CAPÍTULO 2. PÓSTER CIENTÍFICO

ÍNDICE

Cálculo de Longitud de Onda Utilizando una Cámara de Visión Artificial y el Disco de Airy. 519
Uriel Rivera Ortega

Clasificación Auomática de Señales EEG Epilépticas Mediante Máquinas de Vectores de Soporte 520
Said Azael Durán Contreras, Raúl De Jesús Gutiérrez Flores, Valeria Maeda Gutiérrez, Luis C. Reveles Gómez.

Clasificación de los Cinco Grados de Osteoartritis de Rodilla en Radiografías mediante Aprendizaje Profundo 521
Pedro Emilio Mayorga Ruiz, Valeria Maeda Gutiérrez, Manuel Alejandro Soto Murillo

Construcción Escalable de una Base de Conocimiento de Cáncer de Pulmón: Perfilando el Razonamiento Semántico en LLMs 522
César Felipe Martínez Cisneros, Jesús Ulises Quiroz Bautista, Claudia Anahí Guzmán Solano, Bogdan Kaleb García Rivera, Ignacio Arroyo Fernández.

Identification of CRISPR Arrays in Bacterial Genomes Using Deep Learning Models 523
Edna Cruz Flores, Enrique Merino, Lorena Díaz González, Blanca Taboada.

Inteligencia Artificial Generativa como asistente para la Especificación de Requisitos en el Aula de Ingeniería de Software 524
Gómez Álvarez María Clara, Hernández Castillo Jimena, Vanegas Vásquez Santiago

Pruebas Funcionales Asistidas por IA: Diseño y Automatización con LLMs. 525
Maria Clara Gómez Álvarez, Valentina Ospina Narvaez , Santiago Varela Vanegas

VirDetect-AI: New artificial intelligence tool for identifying eukaryotic viral proteins in metagenomic data 526
Alida Esmeralda Zárate Jiménez, Blanca Itzelt Taboada Ramírez, Lorena Díaz González

Visión Artificial para Control de Brazo Robótico 527
Mario Adán Pérez Frías, Said Azael Durán Contreras, Valeria Maeda-Gutiérrez.

Avances en el Desarrollo de Fármaco Regulador de la Hormona Resistina, y su Posible Efecto en Cáncer de Próstata. 528
María Jose Oros Soto, Ana Brenda Ortega Morales, Jose Luis Vique Sanchez.

The Viral Pangenome 529
Oscar Alejandro Uscanga Junco, Lorena Díaz González, Claudia Selene Zárate Guerra, Blanca Itzelt Taboada Ramirez

Caracterización Nutricional de una Bebida de Subproducto de Ajonjolí Extrudido 530
Jesús Geovani Armenta Mendoza, Cesar Alberto Camarena Acosta, Alexander Donaldo Hernández García, Martha Elena Vázquez Ontiveros, Jennifer Vianey Félix Medina, María Fernanda Quintero Soto.

Caracterización Proximal, Fitoquímica, Antioxidante e Hipoglucémica del Subproducto de la Industria Cervecera 531
Alan Ademir Saldaña Vázquez, Juan Antonio García Castro, Edgar Daniel Arzeta Benitez, Martha Elena Vázquez Ontiveros, Estrella Melisa Chavez Millan, María Fernanda Quintero Soto.

Condiciones de Producción para el Pleurotus Ostreatus 532
Jazmín Sarahí Jiménez Ramos, Carlos Manuel Astorga Zaragoza, Eladio Martínez Rayón, Cornelio Morales Morales.

Diseño e Implementación de un Dron Seguidor de Trayectoria para Agricultura de Precisión 533
Garces De La Rosa Jonathan, Hernández Montes David, García Santiago Antonio, Ramírez Castellanos Daniela, Ruiz Gasca Marco Antonio.

Elaboración y Caracterización de Galletas Enriquecidas con Harina de Chicozapote (Manilkara Zapota) 534
Francisco Jesús López Valverde, Danyra Sarahemna Casillas Ortiz, José Ramón Serrano Díaz, Estrella Melisa Chavez Millan, María Fernanda Quintero Soto, Martha Elena Vázquez Ontiveros.

Evaluación del Tipo de Fertilización y Aplicación de Estrés Abiótico Sobre los Compuestos Bioactivos de Chiltepín (Capsicum annuum var. aviculare) 535
Daniela Moreno Limón, María Paula Quiroz Revilla, Paola Hernández Carranza, Sara Rodríguez Rodríguez, Verónica Reyes García, Enrique Ochoa Velasco.

Película Comestible de Almidón (Sechium Edule) con Liposomas 536
Yamel I Solano, Lucio A. Vázquez-León, José M. Juárez-Barrientos, Alejandro Aparicio Saguilán, Delia E. Páramo Calderón.

Potencial Antioxidante, Fitoquímico y Tecno-Funcional de la Semilla de Aguacate 537
Brisel Yamilet Manjarrez Martínez, Erlin Esmeralda Sarabia García, Kenia Juleisi López Samaniego, Britsy María Ayala Martínez, Martha Elena Vázquez Ontiveros, María Fernanda Quintero Soto.

Robot Móvil Analizador de Macronutrientes de Suelo 538
Diana Nuñez Ramírez, Santiago Almonaci Becerra, Marco A. Ruíz Gasca.

Aplicación web para visualizar parámetros de calidad del agua 539
Jorge Cein Villanueva Guzmán, Julio César Romellón Cerino, Ezequiel Gómez Domínguez, Víctor Manuel Arias Peregrino, Pedro Zamora Reséndiz, Nayeli del Carmen López López.

Diseño y Modelado de una Máquina de Embobinado de Filamento para Fabricación de Tubos Compuestos 540
Alvaro De Jesús Ramírez, Carlos De Jesús Ramírez, Fernanda De Jesús Ramírez, Arturo Abúndez Pliego

Evaluación Dinámica de la Digestión Anaerobia Usando el Modelo Reducido ADM1-R4 541
Josué Rodas Citalán, José Luis Ruiz Maldonado, René Alejandro Flores Estrella.

CAPÍTULO 3. PÓSTER DIVULGACIÓN

Encaminándonos a un ambiente más limpio: Síntesis verde 543
Reyes Cruz María Guadalupe, García Rodríguez Nayeli Lizeth.

Fármacos ¿Amenaza Ambiental? Fotocatálisis y el Diseño de Nanomateriales para una Solución Sustentable 544
Deni Blanca Soriano Rodríguez, Luis Antonio García Contreras, Rafael Guillermo Suárez Nájera, José Ocotlán Flores Flores, José Álvaro Chávez Carvayar.

Microplásticos Atmosféricos: Implicaciones en el Cuerpo Humano 545

ÍNDICE

María Inés Mota Gómez, Isabel Araceli Amaro Espejo, María del Refugio Castañeda Chávez, Paula Zúñiga Ruiz, Fabiola Lango Reynoso

Cuando el sol se vuelve combustible: Estrategia de control e innovación solar desde el sur de Morelos 546
Johanna Xitlally Ochoa Tenorio, Marisol Cervantes Bobadilla, Jarniel García Morales, Vicente Borja Jaimes.

Del Dióxido de Carbono a la Energía Limpia 547
Jesus Asael Domínguez Cortes, Marisol Cervantes Bobadilla, Jarniel García Morales, Emmanuel Olmos Barba, Vitervo López Caballero

Educación Ambiental para el Futuro: Misión Net Zero 2050. 548
Jocelyn Damaris Sevilla Pinzón, Santiago Fabrizzio de Jesús Ocampo Vergara, Daniela Hernández Castañeda, Mónica Borunda Pacheco.

Evaluación de un Recubrimiento Anticorrosivo Mediante Ruido Electroquímico. 549
Omar Alejandro González Noriega, Laura Monserrat Alcántara Martínez.

¿Podemos anticipar el Futuro del Océano con Inteligencia Artificial? 550
Emmanuel Romero, Romeo Saldívar Lucio.

Pure Sense 360 Sistema de Monitoreo en la Calidad del Aire 551
Flores Villegas Ángel Gabriel, Díaz Gómez Jesús, Cortés Martínez Kelia Vasthi

Estudio Preliminar para Mantener la Vitalidad de las Plantas Hortícolas Bajo Diferentes Condiciones de Sustrato Y Microambiente 552
Lizbeth Vidal Cortez, Juan Reyes Reyes, Carlos Manuel Astorga Zaragoza.

Instrumentación y Puesta en Marcha de un Reactor Continuo 553
Daniel Moreno Galíndez, Sandro Vazquez Maceda, Manuel Adam Medina, Abisai Acevedo Quiroz, Marisol Cervantes Bobadilla.

Producción de Biopolimeros a Base de Desechos Vegetales. 554
Saul Arturo Morales Palma, Diego Salazar Alvarez.

Producción de Biopolimeros a Base de Pasto Común. 555
Diego Salazar Alvarez, Saul Arturo Morales Palma.

Valorización de Olote de Maíz para la Elaboración de Biopolímeros 556
Guadalupe Rodríguez Martínez, David Reyes González, Itzel Galaviz Villa, Yodaira Borroto Pentón, Nadia Estrella Juan López, Miguel Ángel López Ramírez.

Bioproducción de Pigmentos Fúngicos de Talaromyces: Una Estrategia Sostenible Utilizando Residuos Agroindustriales 557
Lucely Berumen Rangel, Julio César Montañez, Miguel Ángel Villegas Méndez, Nagamani Balagurusamy, María José Castro Alonso, Lourdes Morales Oyervides.

De residuo agrícola a recurso sostenible: Métodos de obtención de fibra del pseudotallo de plátano (Musa Spp.). 558
Erika Adrianne Bandala Martínez, Yodaira Borroto Pentón.

Procesos de Cultivo del Arroz Morelense 559
Cynthia Loeza de la Cruz, Nayeli del Milagro Hernández Barba, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Edwin Javier Barrios Gómez.

Deserción Estudiantil, la Inclusión de los Diversos Factores de la Población del TecNM Campus Iztapalapa III. 560
Brenda E. Benítez M., Vitervo López C., Jesús Arce L.

Desigualdad digital en México: acceso y rezago tecnológico 561
Miguel Isset González Martínez, Gabriela Maqueda Rodríguez

Prototipo Automatizado para Conteo de Tapas Plásticas 562
Ruíz Vidal Josué Jared, García Enríquez Irma Josefina, Bautista Bautista Alberto Nicolás, Medrano Espinoza Rodolfo.

Tapete Interactivo: Una Herramienta Bilingüe para la Preservación del Mixteco 563
Morán Rosete Mariana, Castillo Ramírez Lizet Nataly, Cortés Martínez Kelia Vasthi

Aplicaciones Energéticas de las Manganitas de Lantano 564
Julio César Cázares Gómez, Rafael Guillermo Suárez Nájera, Armando Reyes Montero, Luis Antonio García Contreras, Edilso Reguera Ruiz, José Álvaro Chávez Carvayar.

Batería de Flujo por Electrodiálisis: Una Alternativa Sostenible para Almacenar la energía Renovable. 565
Leonardo Javier Rios Chavez, Jarniel García Morales, Leonardo de Silva Muñoz, Marisol Cervantes Bobadilla, Emmanuel Olmos Barba.

Celdas de combustible 566
Gabriel Barrón Ruíz, Luis Antonio García Contreras, Rafael Guillermo Suárez Nájera, José Álvaro Chávez Carvayar.

Control de temperatura de un electrolizador alcalino para la producción de HHO mediante la adaptación de un intercambiador de calor. 567
Arlett Adame Najera, Víctor Miguel Salinas Cortés, Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, Víctor Manuel Alvarado Martínez, Tomás Emmanuel Higareda Pliego.

El Futuro de la Energía Almacenada: Baterías de Flujo 568
Laura Elena Hernandez Pardiñas, Marisol Cervantes Bobadilla, Mario Román Díaz Guillén, Jarniel García Morales, Manuel Adam Medina.

Electrolito Sólido Base Ceria para Celdas de Combustible 569
Victor Manuel Rincon Fonseca, Luis Antonio García Contreras, Rafael Guillermo Suárez Nájera, José Álvaro Chávez Carvayar.

Generadores de Alto Campo Magnético y Algunas Aplicaciones 570
José Guillermo Duarte León, Rafael Guillermo Suárez Nájera, Jonathan Zamora Mendieta, Luis Antonio García Contreras, Marlene González Montiel, José Álvaro Chávez Carvayar.

Hidrógeno Verde: La Energía Limpia del Futuro 571
Jesús Alberto Gaytán Máximo, Cornelio Morales Morales, Angel Daniel Sánchez Librado, Jaime Navarrete Damián, Nadia Susana Correa Martínez.

Hogar Inteligente, Energía Eficiente: Pequeños Cambios, Gran Impacto 572
Francisco Javier Becerra González, José Gerardo Vera Dimas, Luis Cisneros Villalobos.

Introducción Al Diseño De Un Disipador De Calor Para Un Transistor 573
Gerardo Gómez Gómez, Saúl de Jesús Molina Domínguez, Gustavo Miguel Tovar López, Julio César Llaven Gordillo, Marco Antonio Zúñiga Reyes.

ÍNDICE

Microrredes Verdes 574
Zuleyma Lorena España Ruiz, Mónica Borunda Pacheco, Ma. Guadalupe López López

Refrigeración Magnética de Estado Sólido 575
Rafael Guillermo Suárez Nájera, Armando Reyes Montero, Luis Antonio García Contreras, Marlene Gonzalez Montiel, Edilso Reguera Ruiz, José Álvaro Chávez Carvayar.

Control Líder-Seguidor para Formaciones de Robots Móviles con Ruedas 576
Emiliano Peña Chang, Arturo Daniel Espinosa Pedroza, Guillermo Valencia Palomo, Manuel Adam Medina.

Conversión de Bicicleta Convencional a Eléctrica con Energías Renovables 577
Santiago Villa Castelan, Jareth Jazmín Javier Calixto, Mariela Pérez García, Abisaid Espinoza Romero, Donaciano Flores Gaspar.

Sistema de Estimación de Posición para un Robot 578
Robin Azael Peralta Silva, Bryan Bravo Peña, José Eduardo Vásquez Bautista, Osmar García Zanabria, Yasmin Sarabia Sánchez.

El Poder de la Ionización para Combatir la Escasez de Agua 579
Ek Narváez Anthony Alejandro, Erosa Puerto Emilio Hernán, González Pacheco Ana Nicole, Pech Mena Carlos Santiago, Ramos Reyes Sharon Stephanie.

Greenhouse System 580
Ortega Martínez José Lissandro, Sánchez García Chelsy Belem, Cortés Martínez K.V.

Dron de un solo Rotor, ¡Innovación en Vuelo! 581
Carlos Flores Martínez, Jarniel García Morales, Marisol Cervantes Bobadilla, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Carlos Daniel Urbina Alonso, Luis Enrique Calatayud Velázquez.

Energía en números: cómo las ecuaciones ayudan a entender nuestro metabolismo 582
Peña Vazquez Alma Velia, Flores Romero Juan Francisco, Alonso Bastida Alexis, Salazar Piña Dolores Azucena, Adam Medina Manuel.

Innovación Digital: Una Respuesta a los Retos de la Salud Escolar 583
Cecilia Inés Calderón Ibarra, Dr. Juan Martín Arzola Monreal.

Intercomunicador Basado en el Movimiento Ocular. " Devolviendo la voz a quienes el cuerpo les ha quitado la palabra " 584
Sibaja Shunaxhi del Carmen, Ángeles Jessica, Pinto Arturo

Vigilancia genómica de virus respiratorios y arbovirus en México 585
Blanca Taboada, Esteban Munoz Medina, Alejandro Sanchez Flores, Alfredo Herrera, Angel Salas Lais, Alejandro Uscanga Alida, Zárate Selene Zárate.

Aprovechamiento de los Metabolitos Secundarios Producidos por Hongos Entomopatógenos Endófitos para el Biocontrol en el Cultivo de Maíz 586
Hannia Mancha Rosales, Oralia Antuna Grijalva, Miriam P. Luévanos Escareño.

Diseño y Construcción de un Germinador de Forraje para Ganado 587
Erick Gazca Cecilio, David Peñafort Guerrero, Yadira Jiménez Gallardo, Yael Antonio Navarrete Martínez, Donaciano Flores Gaspar

Valorización del Cotiledón de Mango 588
Vázquez Ontiveros Martha Elena, Quintero Soto María Fernanda, Chavez Millan Estrella Melisa.

Yaca: Fruto Infravalorado en la Región Elota-Piaxtla con Potencial en la Industria Alimentaria. 589
Estrella Melisa Chavez Millan, Martha Elena Vázquez Ontiveros, María Fernanda Quintero-Soto.

Clasificación Inteligente de Movimientos por Visión Computacional para Manufactura Inteligente en PyMEs 590
Armando Mares Castro, José Ramón Gómez Armenta , Mario Guadalupe Moreno Salcido.

Evaluación Dinámica del Comportamiento del Proceso de Digestión Anaerobia Mediante el Modelo Reducido ADM1-R4 591
Josué Rodas Citalán, José Luis Ruiz Maldonado, René Alejandro Flores Estrella.

Fronteras en la Superficie del Océano Detectadas con Algoritmos de Procesamiento de Imágenes 592
Amelia Sánchez Pérez, Emmanuel Romero, Laura Sánchez Velasco.

Listening to Jupiter: Automatic classification of Jovian emissions 593
Sergio Mier Urbina, Arturo Méndez Patiño, Enrique Reyes A., Javier A. Rodríguez H., Marco Vinicio Chávez B., María del Carmen García R., Ernesto Aguilar Rodríguez.

Sistema de Activacion Mediante Sensores Infrarrojos de Dron de Seguridad con Reconocimiento Facial 594
Baqueiro Monforte Luis Adrian, Chab Pantoja Carlos Ivan, Garcia de la Cadena Ariadna Monserrat, Gutierrez Toache Dana Paola, Pech Pamplona Carmita de Jesus, Uicab Canul Pablo Itzamna.

Smart-stop: La Parada De Autobús Que Te Devuelve Tu Tiempo 595
Tristan Adrián Tah Garma, Angel Jose Cen Ek, Jorge Guillermo Flores Reyes, Carlos Manuel Ku Basto, Edrei Asiel Manzanilla Carrillo, Carlos Gabriel Orozco Chac.

Edificación sostenible: una nueva forma de construir y vivir 596
Santiago Fabrizzio De Jesús Ocampo Vergara, Jocelyn Damaris Sevilla Pinzón, Daniela Hernández Castañeda, Monica Borunda Pacheco

ARTÍCULOS

Antimicrobial Resistance in Bacteria Isolated from Clinical and Environmental Samples in Zacatepec, Morelos: A Documentary Analysis

Torres Salgado Madeleine *

Universidad de Puebla (Unipuebla), Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: maddiets75@gmail.com)

Abstract: Antimicrobial resistance (AMR) represents one of the most urgent global health challenges of the 21st century. The emergence and spread of resistant bacteria reduce the efficacy of treatments, increasing morbidity, mortality, and healthcare costs. This documentary review examines antimicrobial resistance patterns in bacteria isolated from clinical and environmental samples in Zacatepec, Morelos, Mexico. Through a comprehensive analysis of scientific literature and official health reports, key bacterial species showing multidrug resistance as *Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae, Pseudomonas aeruginosa, and Staphylococcus aureus* were identified. The study also highlights the detection of resistance genes in environmental matrices such as wastewater, soil, and surface water. By adopting the One Health approach, the review emphasizes the interconnection between human, animal, and environmental health, underscoring the necessity of integrated surveillance, rational antibiotic use, and sustainable environmental practices to contain AMR in the region.

Keywords: antimicrobial resistance, multidrug-resistant bacteria, Zacatepec, clinical and environmental samples, public health, One Health.

1. INTRODUCCIÓN

La resistencia antimicrobiana (RAM) se ha consolidado como una de las principales amenazas sanitarias del siglo xxi, cuyo impacto trasciende la esfera clínica para afectar la seguridad alimentaria, la productividad agrícola y la estabilidad ecológica. Informes internacionales recientes señalan que la acumulación y diseminación de determinantes genéticos de resistencia mediante mutación y transferencia horizontal han transformado a múltiples bacterias comunes en agentes capaces de evadir terapias estándar, prolongar procesos infecciosos y elevar la mortalidad asociada a infecciones bacterianas (OMS, 2023; ISGlobal, 2023). En este contexto, la RAM debe entenderse no solo como un problema biomédico, sino como un fenómeno socioecológico complejo, condicionado por prácticas sanitarias, modelos de producción agropecuaria, sistemas de gestión de residuos y determinantes socioeconómicos locales.

México refleja este panorama global con particularidades regionales. La heterogeneidad en infraestructura sanitaria, la disponibilidad de antibióticos sin control efectivo y la coexistencia de actividades agrícolas intensivas generan "puntos calientes" de selección y amplificación de resistencia. En zonas periurbanas y agroindustriales como Zacatepec, Morelos, caracterizada por cultivo extensivo de caña y hortalizas, actividad ganadera y cercanía a centros de atención primaria y hospitalaria convergen factores que promueven el contacto entre matrices clínicas, animales y ambientales, favoreciendo la circulación bidireccional de bacterias y genes resistentes. Estudios regionales y diagnósticos de cuenca han documentado la presencia de residuos farmacéuticos y detección de determinantes de resistencia en aguas superficiales y suelos irrigados, lo cual sitúa a la región en una condición de riesgo epidemiológico para la diseminación de RAM (IMTA, 2023; Martínez-Ramírez et al., 2021).

El enfoque One Health advocado por organismos como la OMS, la FAO y la OIE provee el marco conceptual más adecuado para abordar la RAM en contextos como Zacatepec. One Health promueve la integración de datos provenientes de la salud humana, la salud animal y la salud ambiental para comprender rutas de transmisión, identificar reservorios y diseñar intervenciones multisectoriales. Aplicado a la RAM, este enfoque pone énfasis en la necesidad de vigilancia sincronizada: no basta con monitorear aislamientos clínicos si se ignoran las fuentes ambientales (aguas residuales, suelos, alimentos) y los usos veterinarios de antimicrobianos que alimentan la presión selectiva. La evidencia científica acumulada muestra que genes como blaCTX-M, blaKPC y mecA no permanecen confinado a hospitales; su movilidad a través de plásmidos e integrones permite que viajen entre distintas comunidades microbianas, incrementando la complejidad de control (Nature Reviews Microbiology, 2022; OPS, 2021).

Además de los mecanismos moleculares, los determinantes sociales resultan críticos para explicar patrones locales de RAM. Prácticas extendidas de automedicación, la adquisición de antibióticos sin prescripción y la interrupción prematura de tratamientos influyen directamente en la selección de fenotipos resistentes en poblaciones humanas. En Zacatepec, encuestas y estudios cualitativos indican una prevalencia relevante de uso de antimicrobianos sin supervisión profesional, lo que añade una capa socioeconómica al problema

técnico-microbiológico. La gestión inadecuada de residuos hospitalarios y farmacéuticos, junto con la falta de plantas de tratamiento eficientes, favorece que compuestos activos y células bacterianas entren a sistemas acuícolas y agrícolas, donde las condiciones ambientales (nutrientes, temperatura, presencia de otros contaminantes) pueden potenciar la persistencia y la transferencia genética.

Desde la perspectiva metodológica y práctica, las revisiones documentales regionales cumplen una función esencial: sintetizar evidencia dispersa, identificar vacíos de conocimiento y orientar prioridades de vigilancia. Sin embargo, la literatura disponible para Zacatepec y zonas adyacentes aún presenta carencias: escasez de series temporales que permitan detectar tendencias, limitaciones en la tipificación molecular en laboratorios regionales y heterogeneidad en metodologías de muestreo entre estudios. Estas limitaciones reducen la capacidad de establecer inferencias causales robustas, aunque no impiden identificar patrones preocupantes y rutas plausibles de transmisión. Por ello, la presente revisión se propone consolidar la evidencia reciente (2015–2025) sobre aislamientos clínicos y ambientales, contrastar mecanismos de resistencia reportados y discutir la relevancia de adoptar estrategias integradas en el marco de One Health.

En resumen, la RAM en Zacatepec debe ser entendida como el resultado de la confluencia entre procesos microbianos universales y factores locales concretos como lo son las prácticas sanitarias, modelos productivos y deficiencias en gestión ambiental. Este trabajo busca aportar una síntesis crítica y contextualizada que sirva de insumo científico para futuras investigaciones, actividades de vigilancia y, en su caso, definiciones de política pública basadas en evidencia. La comprensión holística del fenómeno es el primer paso para diseñar respuestas proporcionales y sostenibles que no se limiten a intervenciones hospitalarias aisladas.

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo se desarrolló bajo un diseño de revisión documental descriptiva, orientada a la recopilación, sistematización y análisis crítico de información científica y técnica relacionada con la resistencia antimicrobiana (RAM) en bacterias aisladas de muestras clínicas y ambientales del municipio de Zacatepec, Morelos. La metodología se estructuró en cuatro fases principales: delimitación del tema, búsqueda bibliográfica, selección y validación de documentos, y análisis e interpretación de resultados.

En la primera fase se definió el objeto de estudio a partir del marco teórico de la iniciativa One Health, considerando la RAM como un fenómeno multidimensional que involucra la interacción entre salud humana, animal y ambiental. Se establecieron tres ejes temáticos para guiar la búsqueda: (a) prevalencia de bacterias resistentes en entornos clínicos y comunitarios, (b) identificación de genes o mecanismos moleculares de resistencia, y (c) factores ambientales y sociales que facilitan su diseminación.

Durante la segunda fase se efectuó la búsqueda sistemática de información entre marzo y septiembre de 2025. Se consultaron bases de datos internacionales y regionales PubMed, Scielo, ScienceDirect, RedALyC y Google Scholar— utilizando combinaciones booleanas de palabras clave en inglés y español, tales como antimicrobial resistance, environmental bacteria, clinical isolates, Morelos, Zacatepec, One Health, resistencia antimicrobiana, aislamientos bacterianos y genes de resistencia. Asimismo, se incluyeron reportes técnicos y boletines oficiales emitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), el Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos (InDRE) y la Secretaría de Salud de México.

Los criterios de inclusión abarcaron artículos originales, revisiones sistemáticas, reportes técnicos o tesis publicadas entre 2015 y 2025, que cumplieran con los siguientes requisitos:

1. Describir aislamientos bacterianos clínicos o ambientales.
2. Reportar resultados de susceptibilidad antimicrobiana o detección molecular de genes de resistencia.
3. Proporcionar información contextual sobre el lugar de muestreo o las condiciones ambientales.

Se excluyeron publicaciones duplicadas, notas periodísticas, documentos sin acceso al texto completo y estudios cuyo enfoque se centrará exclusivamente en hongos o virus.

En la tercera fase, los documentos seleccionados fueron evaluados según su pertinencia temática, calidad metodológica y año de publicación. Se aplicó un sistema de codificación para clasificar la información según el tipo de muestra (clínica o ambiental), especie bacteriana, antimicrobianos evaluados, mecanismos de resistencia detectados y localización geográfica. Los datos se organizaron en una matriz comparativa que permitió identificar coincidencias, divergencias y tendencias entre fuentes.

Finalmente, en la fase de análisis se integró la información en un marco interpretativo apoyado en el enfoque One Health, permitiendo establecer relaciones entre los hallazgos clínicos y las evidencias ambientales. Se optó por un análisis descriptivo y comparativo, sin aplicación de estadística inferencial, dada la naturaleza cualitativa de la revisión. Este método permitió reconocer vacíos de información, limitaciones estructurales y potenciales líneas de investigación orientadas al monitoreo de resistencia antimicrobiana en Zacatepec y en regiones con características similares del centro de México.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

De un total de 42 documentos revisados, 37 cumplieron con los criterios de inclusión y fueron analizados en profundidad. La síntesis de los hallazgos permite observar una elevada prevalencia de bacterias multirresistentes tanto en entornos clínicos como ambientales del municipio de Zacatepec, Morelos. Los resultados evidencian que las bacterias

gramnegativas, en particular Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae y Pseudomonas aeruginosa, presentan los niveles más altos de resistencia, asociados principalmente a la producción de β-lactamasas de espectro extendido (BLEE) y carbapenemasas. En contraste, las bacterias grampositivas como Staphylococcus aureus muestran una frecuencia menor, aunque con implicaciones clínicas severas por su resistencia a meticilina (SARM). En el ámbito ambiental, la detección de genes de resistencia en aguas residuales y suelos contaminados del río Apatlaco confirma la existencia de un reservorio natural de material genético que favorece la transferencia horizontal entre especies bacterianas. Esto concuerda con reportes del IMTA (2023) y del INECC (2020), que advierten sobre el papel de los efluentes urbanos y agrícolas en la persistencia de contaminantes emergentes.

El análisis integral de los datos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resistencia antimicrobiana en bacterias de Zacatepec: resultados e impacto

Bacteria	Nivel de Resistencia (%)	Mecanismo predominante	Impacto clínico y ambiental
Escherichia coli (BLEE)	86	β-lactamasas de espectro extendido	Alta resistencia a antibióticos críticos; riesgo de transmisión comunitaria.
Klebsiella pneumoniae (carbapenemasas)	47	Producción de carbapenemasas tipo KPC	Complica infecciones hospitalarias y aumenta estancia hospitalaria.
Pseudomonas aeruginosa (multirresistente)	30	Bombas de eflujo y mutaciones en porinas	Causa infecciones persistentes y limita opciones terapéuticas.
Staphylococcus aureus (SARM)	23	Alteración del sitio PBP2a	Asociado a infecciones cutáneas y hospitalarias graves.
Genes de resistencia en ambiente	65	Integrones, plásmidos, transposones	Detección en aguas residuales y suelos contaminados.
Factores asociados (uso, educación, contaminación)	80	Multifactorial	Automedicación, contaminación y educación sanitaria deficiente.

Estos resultados sugieren que la resistencia antimicrobiana en Zacatepec responde a un patrón multifactorial en el que convergen factores sociales, ambientales y biológicos. La presencia de genes de resistencia en cuerpos de agua y suelos agrícolas refleja la interacción directa entre la salud humana, animal y ambiental, reforzando la necesidad de adoptar estrategias bajo el enfoque One Health.

Comparativamente, los porcentajes de resistencia observados en Zacatepec son similares a los reportados en estudios nacionales sobre la cuenca del río Apatlaco (Martínez-Ramírez et al., 2021; Rivera y López, 2022) y coinciden con tendencias globales descritas por la OMS (2023) y la OPS (2024).

La diseminación de bacterias resistentes en sistemas acuáticos representa una amenaza persistente, ya que estos ecosistemas actúan como reservorios donde los antibióticos, los genes de resistencia y las bacterias interactúan de forma constante, generando una presión selectiva que perpetúa el problema.

Asimismo, factores locales como el uso inadecuado de antibióticos en humanos y animales, la disposición deficiente de medicamentos caducos y la falta de tratamiento adecuado de aguas residuales agravan la situación. Estudios de la COFEPRIS (2022) y el PNUMA (2023) coinciden en que la educación sanitaria y la gestión de residuos farmacéuticos son componentes críticos para romper el ciclo de resistencia.

Desde el punto de vista clínico, el incremento de E. coli BLEE y K. pneumoniae carbapenemasa-producoras limita las opciones terapéuticas, incrementando los costos hospitalarios y la mortalidad asociada. Estos hallazgos subrayan la urgencia de fortalecer la vigilancia epidemiológica local, con especial atención a hospitales de segundo nivel y laboratorios de análisis clínico en la región de Zacatepec.

4. CONCLUSIONES

La resistencia antimicrobiana (RAM) observada en Zacatepec, Morelos, constituye un fenómeno complejo que trasciende el ámbito clínico, abarcando componentes ambientales y sociales. Los estudios revisados confirman la presencia de Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae, Pseudomonas aeruginosa y Staphylococcus aureus resistentes a múltiples antibióticos, tanto en hospitales como en aguas residuales, suelos agrícolas y cuerpos receptores.

La detección de genes de resistencia en entornos ambientales revela que los ecosistemas actúan como reservorios y vías de propagación de determinantes genéticos, lo que demuestra la estrecha interconexión entre salud humana, animal y ambiental. Esta evidencia sustenta la aplicación del enfoque One Health, indispensable para comprender la dinámica de la RAM a nivel local y regional.

Más que emitir recomendaciones específicas, este análisis resalta la importancia de fortalecer los sistemas de vigilancia epidemiológica y ambiental, impulsar investigaciones interdisciplinarias y promover políticas integradas que permitan reducir la carga de resistencia antimicrobiana en comunidades como Zacatepec. La información disponible,

aunque limitada, ofrece un punto de partida para futuras líneas de investigación orientadas a la prevención, monitoreo y mitigación del fenómeno en el sur del estado de Morelos.

5. REFERENCIAS

COFEPRIS. (2022). *Informe anual sobre el uso racional de antibióticos en México*. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, Ciudad de México.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2023). *Evaluación de contaminantes emergentes y genes de resistencia en la cuenca del río Apatlaco*. Jiutepec, Morelos: IMTA.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). *Residuos farmacéuticos en ambientes acuáticos: diagnóstico y perspectivas.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México.

Martínez-Ramírez, R., Hernández-Bautista, E. y Cortés-Luna, M. (2021). 'Prevalencia de bacterias resistentes en cuerpos de agua del estado de Morelos', *Revista Mexicana de Microbiología Ambiental*, 18(2), pp. 44–52.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). *Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS) Report 2023*. Ginebra: OMS.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2024). *Situación de la resistencia antimicrobiana en las Américas: avances y desafíos.* Washington, D.C.: OPS.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2023). *Antimicrobial resistance and the environment: global review and regional perspectives*. Nairobi: PNUMA.

Rivera, L. y López, J. (2022). Genes de resistencia bacteriana en sedimentos del río Apatlaco y su relación con contaminación urbana, *Salud Ambiental México*, 29(3), pp. 115–123.

World Health Organization (WHO). (2023). *One Health Joint Plan of Action 2023–2027*. Geneva: WHO Press.

A Preliminary System for Sound and Environmental Monitoring in Beehives Using LoRa Transmission.

Juan Antonio Villa-Guerrero*. Celina Lizeth Castañeda-Miranda*. Mireya Moreno-Lucio*. Luis Octavio Solís-Sánchez*. Ma. Del Rosario Martínez-Blanco. Héctor Alonso Guerrero-Osuna**.**

**Laboratorio de Sistemas Inteligentes de Visión Artificial, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zac 98000 MEX (e-mail: javillaguerrero2206@gmail.com, celina@uaz.edu.mx, mireya.moreno@uaz.edu.mx, lsolis@uaz.edu.mx).*

***Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zac 98000 MEX (e-mail: mrosariomb@uaz.edu.mx, hectorguerreroo@uaz.edu.mx).*

Abstract: - Beekeeping is a vital activity in rural areas, not only for its economic impact but also for its contribution to the ecosystem through pollination. In rural regions of Mexico, where beekeeping is a fundamental source of income, maintaining and protecting hives are challenging tasks due to their distance from population centers (Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2016). This paper presents the preliminary development of a system for monitoring beehives based on the acquisition of auditory and environmental data, transmitted point-to-point via LoRa (Long Range) technology over distances of up to 1 km line-of-sight, using helical antennas for printed circuit boards. A MAX9814 microphone was used to capture audio signals, which were processed by an ESP32 together with BME680 sensors. These sensors measured internal and external factors like temperature, humidity, pressure, and gases. The data is sent using LoRa. In the future, we plan to add cloud storage, develop a mobile app, and use artificial intelligence models for predictive analysis. The preliminary results confirm the feasibility of capturing and transmitting audio and environmental variables, laying the groundwork for advanced studies and feeding a database that will enable in-depth analysis of beehive behavior.

Keywords: Beekeeping Monitoring, LoRa, IoT, Audio, Artificial Intelligence.

1. INTRODUCTION

The honeybee (*Apis mellifera*) is a social insect that lives in colonies and is divided into three castes: the queen, the only fertile bee; the workers, infertile females responsible for secreting wax, cleaning the hive, collecting pollen, and feeding larvae; and the drones, whose sole function is to fertilize the new queen (Faunia, 2025). Beekeeping is a fundamental agricultural activity for crop pollination and ecological balance. In Mexico, it has high social and economic value, supporting more than 43,000 producers and positioning the country as the third largest honey exporter in the world, after China and Argentina (Alvarado Downing & Mayorga Castañeda, 2012).

However, the distance between apiaries and populated centers poses a significant challenge, as beekeepers must make frequent trips, even during periods of low production, to monitor the health and safety of their hives (Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2016). These visits represent transportation costs and time commitments. Precision beekeeping uses monitoring and remote communication technologies to improve these practices, making colony management more effective than with traditional methods.

This paper presents the design and development of an embedded system for monitoring environmental and sound parameters in beehives, with a focus on the honeybee. The system uses an environmental sensor to measure temperature, humidity, pressure, and the levels of internal and external gases in the hive. It also includes a microphone that records acoustic signals, capturing up to 50,000 samples per cycle at 5 kHz for 10 seconds and a GPS module for real-time geolocation. Additionally, a magnetic switch is implemented as a security sensor to detect openings or intrusions into the hive.

Data transmission uses 915 MHz LoRa modules with helical antennas, which have demonstrated an effective line-of-sight range of up to 1 km. This allows data collected from beehives located in rural areas to be sent to a central receiver for analysis. During preliminary tests, the system reliably sent large amounts of audio data and environmental information while using little power. This confirmed that it works well and is stable in real-world conditions. This communication technology was chosen for its potential for long-range, low-power consumption, and for the goal of reducing system operating costs, as this type of connection has been successfully implemented in environmental monitoring projects such as Dufary *et al.,* 2023, in their article “Desarrollo de una arquitectura IoT para monitoreo ambiental” in which they were able to successfully measure and transmit variables such as relative humidity and temperature, in addition to having several nodes that record the information and the ability

to display all the information on a single control panel with the help of IoT.

The integration of these components aims to generate a functional prototype for the continuous collection of data in beehives, contributing to the detection of adverse environmental conditions, alarm states in the colony, as well as possible thefts or intrusions for the subsequent implementation of artificial intelligence models and predictive algorithms that allow the detection of behavioral patterns in the hive, prevent diseases, optimize honey production and strengthen data-driven decision-making.

These systems are not intended to replace the work of the beekeeper, but rather to serve as complementary tools that strengthen precision beekeeping in Mexico and around the world, integrating engineering, IoT, and data science to protect and preserve the honeybee and the environmental balance it sustains.

2. METHODOLOGY

2.1 General System Design

The system design started by identifying the key parameters to monitor in the hive. These include temperature, humidity, atmospheric pressure, air quality (gases), internal sound, geolocation, and intrusion detection. Based on a comparative analysis of low-power technologies, the ESP32 microcontroller was selected for its dual-core processor, 520 KB RAM, integrated Wi-Fi connectivity (for future expansion), and robust support for SPI and I2C, which are essential for connecting multiple sensors and the LoRa module.

A modular prototype was developed in which the following were integrated:

- BME680 sensor (internal and external): to monitor temperature, humidity, pressure, and gases, with which the same variables could be measured inside and outside the hive.
- MAX9814 microphone: with automatic gain and integrated high-pass filter, allowing the capture of acoustic signals up to 2.5 kHz (since the sampling is done at 5 kHz, by the Nyquist theorem; Oppenheim & Schafer, 2009), a sufficient range for the preliminary sound analysis of the colony.
- GT-U7 GPS module: connected via UART to obtain coordinates with an accuracy of ±2.5m and a magnetic switch connected with an internal pull-up resistor, used to detect unauthorized openings of the hive.
- LoRa SX1278 module: is a low-power radio transceiver that uses LoRa modulation for long-range wireless communication applications.

Figure 1 shows the flowchart that describes the process to be followed by the system.

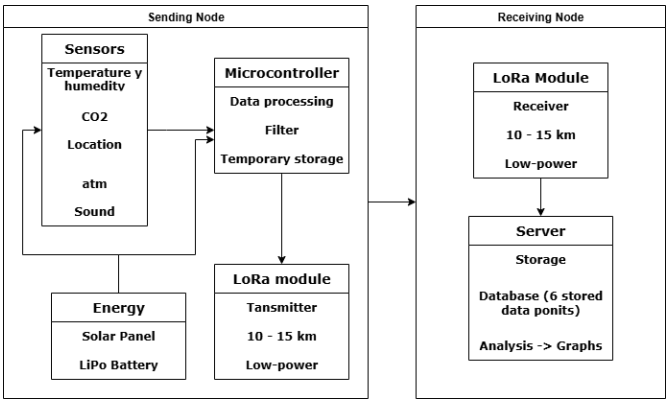


Figure 1. System flow diagram

2.2 Integration of the Data Acquisition System

The programming was done in Arduino IDE using the Adafruit_BME680, TinyGPS++, LoRa libraries, and operates under a sequential flow divided into three main phases:

Initialization phase: pin configuration, I2C, SPI and UART protocols; verification of sensor and module connections by reading test values and turning on error LEDs in case of critical failure.

Acquisition phase: 50,000 audio samples are captured at 5 kHz during 10-second intervals, internal and external environmental readings (temperature, humidity, pressure and gas levels), GPS reading for a span of 2-5 seconds to ensure the acquisition of the " fix " (position validated by satellites) and calculation of local time (UTC-6), the status of the switch that indicates intrusion.

Processing and transmission phase: Audio data is packaged into blocks of 50 samples (100 bytes) and transmitted via LoRa in sequential packets, each identified by an ID byte.

Subsequently, the sensor and GPS data are sent in separate text packets, and the transmission is ended with a packet containing the keyword "FIN" to indicate the end of the measurement.

2.3 Programming and Power Management

It is worth mentioning that the model is in its prototype version, which is why the following adjustments were made: to reduce energy consumption, the system was programmed to enter deep mode sleep (state of low energy consumption) During 5-minute intervals, for faster testing purposes, the final implementation plans to take measurements every 45 minutes, triggered by an integrated RTC timer.

The GPS module stays active at all times because its cold-start signal acquisition takes more than 30 seconds. This way, the system can update its position almost instantly when it wakes up.

A 5V 10000mAh lithium battery (power bank) was also used to power the microcontroller and sensors, sized for an estimated autonomy of 36-48 hours in a continuous measurement cycle, expandable with a 5W solar panel and charge controller, which is being considered for final field implementations.

2.4 Preliminary Testing in Laboratory and Field Conditions

LoRa transmission test: Tests were conducted in an open field with line of sight at distances of approximately 100 m, 250 m, 500 m, and 1000 m. Helical antennas and the 915 MHz frequency were included in the communication module. The system achieved successful transmission and complete packet reconstruction up to 1000 m, with occasional packet loss (less than 1%) attributed to interference and desynchronization of transmission and reception times.

Audio acquisition test: Audio recordings were made with controlled stimuli of 400 Hz and 1000 Hz. The graphics show the generated signal, demonstrating its usefulness for analyzing the acoustic behavior of bees, consistent with studies showing a correlation between frequency bands and the colony's state of swarming or tranquility (Qandour et al., 2014).

Intrusion detection test: The opening of the hive was simulated by moving the switch; the events were correctly recorded and transmitted along with environmental variables and GPS, ensuring real-time detection.

Figure 2 shows the prototype assembly in its transmitter version for field testing and measurements. Figure 3 shows the receiver node, which is connected to the computer's serial monitor to display the data collected during measurements in the apiary.

Figure 2. Photograph of the experimental field setup showing the transmitter node and its sensors.

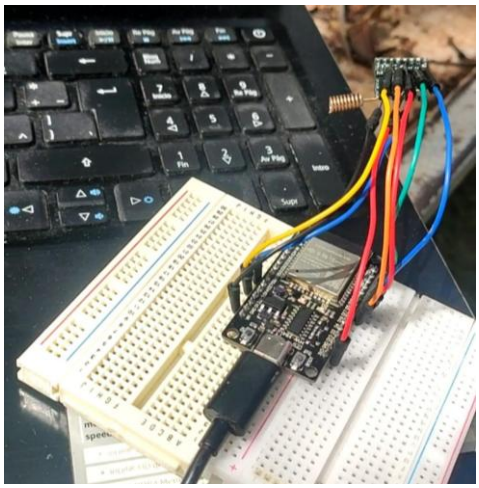


Figure 3. Photograph of the experimental field setup showing the receiver node.

2.5 Data Processing and Visualization

The received data were stored in CSV files and processed in Excel for exploratory analysis, generating signal amplitude histograms, frequency spectra, and environmental correlation graphs. The data will be migrated to a cloud database in the future, which will facilitate historical analysis, support the development of machine learning predictive models, and enable their integration into a mobile application for real-time remote monitoring of the complete database.

3. RESULTS

The implementation of the embedded monitoring system for beehives yielded satisfactory preliminary results. The system was able to acquire environmental and sound data from the hive, process it, and transmit it via LoRa to a receiver located approximately 1 km away, in line of sight, using helical antennas at 915 MHz.

3.1 Acoustic Data Acquisition

The audio acquisition subsystem, consisting of the microphone and the ESP32's internal ADC configured for 5 kHz sampling, recorded 50,000 samples at 10-second intervals for each measurement. These samples were packaged into blocks of 50 and transmitted via LoRa.

Figures 4 and 5 show the external ambient sound signal compared to the internal signal from one of the beehives. Figure 4 presents the external ambient signal, while Figure 5 displays the signal from beehive 1. For both figures, the digital value of the audio signal (Y-axis) is plotted against the number of samples (X-axis), with a sampling rate of 50,000 points per measurement. The beehive signal has a higher amplitude and greater variation due to the bees' acoustic activity. In contrast, the external ambient measurement changes less.

Figures 6 and 7 show the exact measurements taken from hives 2 and 3. This data helps provide more information about the internal conditions in other healthy bee colonies.

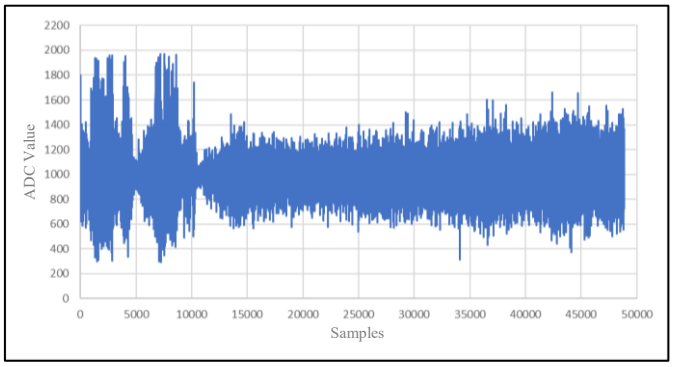


Figure 4. Measurements of External Environmental Sound.

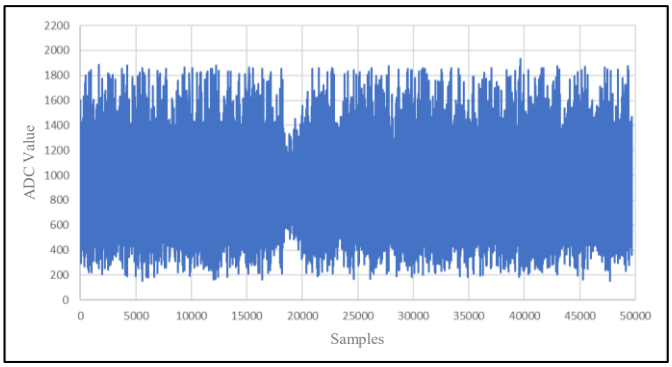


Figure 5. Internal Sound Measurements of Hive 1.

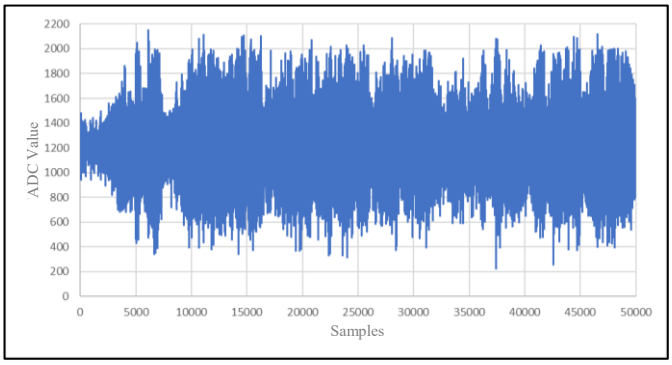


Figure 6. Internal Sound Measurements of Hive 2.

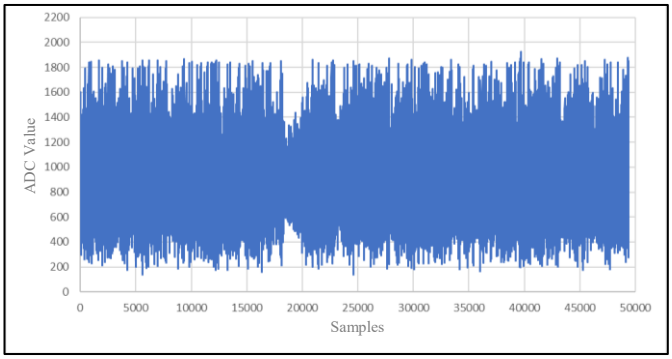


Figure 7. Internal Sound Measurements of Hive 3.

This information can be used for various types of analysis, including quantitative analysis. For example, it helps detect activity patterns to estimate the colony's condition. Figure 7 shows lower values than hives 1 and 2 because fewer bees were present in that hive during the measurement and development of artificial intelligence algorithms for automatic prediction of hive behavior and internal conditions. Additionally, the data can be stored on servers and processed remotely, facilitating its integration into early warning systems and mobile applications for precision beekeeping.

Also include identification of dominant frequencies using Fast Fourier Transforms (FFT) (as shown in Figure 8, generated in MATLAB, which corresponds to the frequency spectrum of each sound measurement shown in figures 4 to 7) or similar methods. This would reveal the dominant frequencies of the captured signal, allowing a subsequent study to verify the hive's state using the obtained samples. This is being considered as future work after the corresponding improvements are implemented.

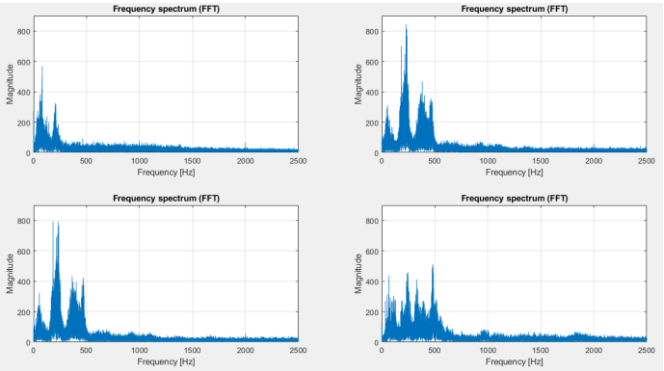


Figure 8. Frequency analysis of the obtained signals.

2.6 LoRa Transmission

Data transmission using LoRa was successfully achieved over a line-of-sight distance of 1 km, using the module's original spring-type antennas. No significant packet loss was observed during short-range tests at distances of less than 100 meters. As the distance increased and obstacles like trees appeared, some sample losses occurred. This result is expected because of how LoRa modulation works and its signal-to-noise ratio. To mitigate these losses, corrections such as integrating retry codes, implementing error-checking algorithms, and using higher-gain antennas can be implemented.

2.7 Environmental Measurements

Measurements taken with the BME680 sensor in the environment and in the hives yielded values consistent with the region's climatic conditions during the testing period. Table 1 summarizes the information collected during the first stage of testing and provides a preliminary analysis.

The results of field tests show expected behavior across the monitored environmental variables, as well as stable performance of the embedded system components. Measurements were taken both inside three beehives and in the immediate surroundings, allowing for a direct comparison between internal and external conditions.

The hives maintained a consistent temperature range of 29 °C to 33 °C, which aligns with healthy apicultural environments, where bees regulate temperature to support brood development. External conditions showed slight variability within normal limits, ranging from 33 °C to 34 °C. This confirms both the colonies' ability to regulate their temperature and the accuracy of the BME680 sensor.

Relative humidity was significantly higher inside the hives compared to the surrounding environment.

The hives registered humidity levels as high as 47.1%, while external environmental conditions were considerably drier, with values dropping to 19.92%. This is consistent with the colony's biological needs, as moderate humidity is essential for bee breeding, since relative humidity in brood combs is usually maintained between 40% and 70%, a range considered suitable for hatching and larval development (Oliver, 2016).

Concerning atmospheric pressure, the values were similar across all measurement points, as expected given that the tests

were conducted at the same altitude. The slight variations are within the expected margin of error for barometric sensors.

About the gas index (measured in kOhms), notable differences were observed between the internal and external environments. The hives had lower values, indicating higher levels of volatile organic compounds (VOCs) inside. These VOCs are produced by bees' metabolic activity and the fermentation of organic materials. This supports the usefulness of measuring internal air quality as an indirect tool for monitoring hive activity, although more precise sensors are being considered for future tests.

The geographic coordinates and altitude obtained using the GPS module showed excellent stability and accuracy. No significant variations between measurements or position errors were detected (validated with Google Earth), confirming that the data is correctly georeferenced. The recorded altitude remained constant across all hives, with minimal differences attributable to decimal rounding.

Microphone sound monitoring showed that the hives had higher signal density and dB levels than the surrounding area, as shown in the included graphs. This suggests significant internal activity, likely resulting from the movement, buzzing, and ventilation generated by the worker bees.

Finally, data transmission through the LoRa SX1276 module was consistent and stable. In all tests, data was received correctly, with minimal reception errors and no significant packet loss, even at distances of up to 1 km line of sight using integrated helical antennas, which are not suitable for this type of project.

Table 1. Environmental Measurement Results

Component	Parameter	Hive 1 (test 1 / test 2)	Hive 2 (test 1 / test 2)	Hive 3 (test 1 / test 2)	External measures (test 1 / test 2)
Environmental conditions sensor	Temperature (°C)	33.06 / 31.8	29.5 / 29.2	30.7 / 30.3	34.2 / 33.5
	Humedity (%)	42.65 / 47.1	34.3 / 36.0	44.8 / 45.3	19.92 / 23.41
	atm pressure (hPa)	792.68 / 793.0	794.1 / 794.5	791.3 / 791.8	793.64 / 793.04
	Gas (KOhms)	7.98 / 8.21	10.62 / 10.19	12.76 / 13.61	13.57 / 13.39
GPS	Altitude (m)	2021.77	2023.4	2023.7	2017.34 / 2020.45
	Latitude / Longitude	22.845299 / –102.403035	22.848299 / –102.403035	22.848294 / –102.403020	22.848301 / –102.403109
Microphone	Sound level (dB)	Figure 5	Figure 6	Figure 7	Figure 4
LoRa Module	Transmission status	Correct	Correct	Correct	Correct

These initial results validate the functionality of the embedded data-acquisition and transmission system for beekeeping. As part of the project's evolution, the first version of the printed circuit board (PCB), shown in Figure 9, has been designed and is ready for manufacturing. Its implementation will enable the compact integration of all system components, thereby improving the device's robustness, energy efficiency, and portability. This next phase will depend on the results of future field tests evaluating the system's stability, energy autonomy, and scalability across multiple hives.

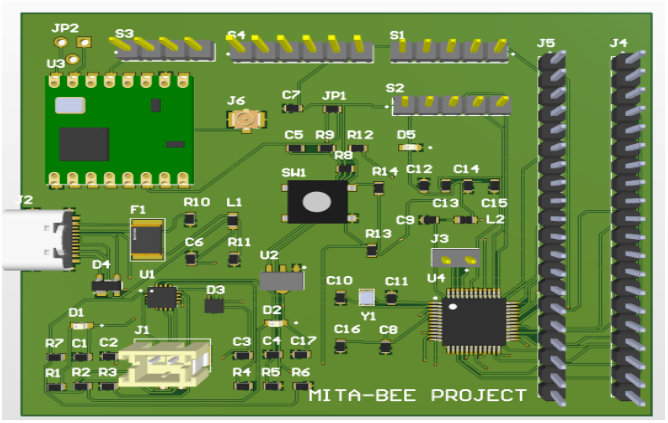


Figure 9. Prototype PCB Version

4. CONCLUSIONS

This work demonstrates the technical and operational feasibility of developing an embedded system for the remote monitoring of beehives, applying low-power technologies and long-range wireless communication. By integrating environmental sensors, a GPS module, an acoustic pickup microphone, and a LoRa module, it was possible to obtain relevant data from the beehive's internal and external environments and reliably transmit it to a remote receiver.

It is worth noting that the initial tests consisted of eight measurements: two on the apiary's general environment and two on three different hives, and were carried out on June 26, 2025, starting at 2 pm in the community of Tacoaleche, Gpe, Zac, Mexico.

The first observations showed that inside the hives, a constant temperature of 29-33 °C was maintained, suitable for bee development, thanks to the thermal control they themselves maintain. However, slightly higher temperatures were recorded outside (Table 1).

Internal humidity was slightly higher than external humidity, but remained within the range considered suitable for hatchling development. As for pressure, the difference between the inside and outside was minimal, as expected (Table 1).

Regarding air quality, the BME680 sensor recorded MOX sensor electrical resistance values that reflect low concentrations of volatile organic compounds (VOCs), indicating adequate environmental conditions inside the hives (Table 1).

Furthermore, the recorded altitude remained constant between hives, and the coordinates obtained showed no significant variations. Additionally, increased sound activity was observed within the hives, consistent with the expected behavior of bees under normal operating conditions (Table 1).

Finally, data was successfully sent to the receiving system, with only minor communication losses. Figures 4 and 6 show that there is not enough data at the end of the graphs to reach 50,000 samples.

The results obtained validate the proposed design and demonstrate that this type of tool can serve as a strategic ally

for beekeepers, especially those in hard-to-reach rural areas. The information recorded in the first database (temperature, humidity, atmospheric pressure, air quality, internal sound, and geographical location) can be key to anticipating unusual

l hive behavior, assessing adverse environmental conditions, or detecting potential external threats.

This first prototype opens the door to new ways of observing and understanding the internal dynamics of beehives without the need for constant physical intervention. Its implementation aims to achieve more efficient, documented, and technology-assisted beekeeping, which could lead to significant improvements in decision-making and bee welfare.

4.1 Limitations

One of the main challenges was occasional packet loss during LoRa data transmission, which can compromise the integrity of acoustic samples if robust verification mechanisms are not in place.

The acquisition and transmission of the 50,000 audio samples required per session resulted in long delays and critical synchronization dependencies, especially under interference or weak-signal conditions. Furthermore, although the system has energy autonomy via rechargeable batteries, their lifespan still needs to be optimized to withstand extended periods of inactivity, particularly in harsh climates or with low solar radiation, should this type of power be incorporated in the future.

Another limitation was the GPS module's sensitivity, which, by its nature, requires time to fix its position, especially after prolonged periods of rest or in areas with obstructions.

The system underwent evaluation at a maximum line-of-sight distance of approximately 1 km using spring-type helical antennas. Although the initial results were promising, additional testing in more complex environments, including wooded areas or locations with physical obstacles, is required.

4.2 Recommendations

The next phase consists of expanding the number of sensors and monitored hives, enabling the use of statistical analysis and machine learning to detect events such as swarming, infestation, or theft at an early stage. It is also proposed to apply digital filtering techniques and transforms (such as FFT or Wavelet) to analyze the acoustic behavior of bees further.

To improve the hardware, the final PCB version should be made. This will help the design become more compact, sturdy, and efficient. Additionally, higher-gain antennas should be considered, as well as the study of redundant communication alternatives in areas where LoRa might be limited.

Finally, it is recommended to work with beekeepers from different regions to validate the system under diverse environmental conditions, thereby strengthening the final design.

REFERENCES

Alvarado Downing, G.E. & Mayorga Castañeda, F.J. (2012). Patología, diagnóstico y control de las principales enfermedades y plagas de las abejas melíferas. México, D.F. C.P. 09750: Imagen Editorial Yire. [Online] Accessed on 26 May 2025. Available at: https://atlas-abejas.agricultura.gob.mx/pdfs/PATOLOGIA_DIAGN_CNTRL_ENFRMDDS_ABEJAS_MELIFERAS.pdf

Faunia. (2025). Abeja Melífera en Faunia: Descubre su Mundo Fascinante. Faunia, el Parque Temático de la Naturaleza. [Online] Accessed on 26 May 2025. Available at: https://www.faunia.es/planea-tu-visita/animales/abeja-melifera

Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2016). Apicultura, Actividad De Gran Importancia Para La Economía Y El Medio Ambiente En México. Gobierno de México. [Online] Accessed on 26 May 2025. Available at: https://www.gob.mx/firco/articulos/apicultura-actividad-de-gran-importancia-para-la-economia-y-el-medio-ambiente-en-mexico?idiom=es

Oliver, R. (2016). Observations on Pollen Subs Part 4: Nectar, Water, and Humidity. Scientific Beekeeping. [Online] Accessed on 12 July 2025. Available at: https://scientificbeekeeping.com/observations-on-pollen-subs-part-4-nectar-water-and-humidity/

Qandour, A., Abdullah, H., Benveniste, B. & Sammut, M. (2015). Remote monitoring of beehive sounds using Internet of Things devices. Procedia Computer Science, 76, pp. 507–512. [Online] Accessed on 12 July 2025. Available at: https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.31

Sánchez, D.V., Muñoz-García, A., Chaverra-Zuleta, E., Correa-Casas, J., Fernando-Londoño, L. & Bustamante-Rúa, O. (2024). Desarrollo de una arquitectura IoT para monitoreo ambiental: integración de tecnologías de código abierto con proyección de aplicación en el sector minero. DYNA, 91(231). [Online] Accessed on 10 November 2025. Available at: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9555682

A Review on the Impact of Materials on the Mechanical Performance of Energy- Storing-and-Returning (ESR) Foot Prostheses

Sandra Yaraset Vara Salas *, Enrique Alcudia Zacarias*, Juan Antonio Paz González **, Juan Antonio Ruiz Ochoa**

** Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Int. Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos, México. CP.62490. (m24ce093@cenidet.tecnm.mx, enrique.az@cenidet.tecnm.mx).*

*** Universidad Autónoma de Baja California/ Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Blvd. Universitario #1000. Unidad Valle de las Palmas. Tijuana, Baja California, México. C.P.21500 (pazj@uabc.edu.mx, ruizj99@uabc.edu.mx).*

Abstract: In this work, the research reported in the literature was analyzed to determine the impact of materials on the mechanical performance of ESR prostheses through a systematic analysis of twenty studies published between 2010 and 2025. The objective was to determine how the type of material influences the stiffness and strength of ESR prosthetic designs. The methodology included a structured literature search, the classification of materials into five families (carbon fiber, fiberglass, metals, hybrid composites, and 3D-printed polymers), and the extraction of quantitative data, such as the modulus of elasticity and strength, from each study. The results showed that the level of stiffness achieved in the prosthesis is strongly related to the type of material chosen for its design. For example, carbon fiber/epoxy (E≥100 GPa, σ≥700 MPa) was used in prostheses with high stiffness levels; this material has an excellent stiffness-to-weight ratio and energy return capacity. On the other hand, fiberglass/polyester (E=30 to 80 GPa, σ=300 to 600 MPa) was used for prostheses with a medium stiffness level, as this material offers a good cost-performance ratio. Finally, 3D-printed polymers (E<30 GPa, σ<300 MPa) were used for prostheses with a medium stiffness level. The main advantage of this material is that it allows for the creation of prostheses with complex shapes and in a shorter manufacturing time. However, further research is needed on printed polymers to increase the stiffness, strength, and mechanical performance of the prostheses. In summary, stiffness is a critical parameter in the design of ESR prostheses: low stiffness leads to excessive flexibility and energy loss, while very high stiffness improves energy return but can compromise user comfort. Future work in foot prosthesis design should focus on developing standardized testing protocols and integrating adaptive or variable stiffness materials to optimize performance according to the user's activity and biomechanical needs.

Keywords: Transtibial Prosthesis, Composite Materials, 3D Printing, Energy Return

1. INTRODUCCIÓN

Las prótesis son dispositivos médicos diseñados para remplazar parcial o totalmente una parte del cuerpo ausente, con el objetivo de restaurar funciones biomecánicas y mejorar la calidad de vida de los usuarios. En particular, las prótesis de miembro inferior desempeñan un papel esencial al proporcionar movilidad y estabilidad. Dentro de este grupo el pie protésico busca reproducir las funciones del pie humano, tales como soportar el peso corporal, absorber impactos y facilitar la marcha(Portnoy et al. 2012). Entre las tecnologías más avanzadas desataca la prótesis tipo Energy Storing and Returning (ESR), la cual almacena energía durante la fase de apoyo y la libera en la fase de impulso, promoviendo una marcha más eficiente y reduciendo el gasto energético del usuario (P. Cherelle Glenn Mathijssen 2015). Sin embargo, a pesar de sus ventajas biomecánicas, el acceso a estas prótesis continúa siendo limitado, especialmente en países en desarrollo, debido al alto costo de los materiales avanzados principalmente fibra de carbono y a los procesos de manufactura especializados requeridos (Irfa'i et al. 2021)(Al Thahabi et al. 2025).

Ante este panorama, ha surgido un interés para evaluar como los materiales influyen en el desempeño mecánico de las prótesis ESR. En la literatura reciente se identifican cinco familias representativas de materiales: fibra de carbono, fibra de vidrio, fibras naturales, polímeros de impresión 3D y metales o compuestos híbridos (Castro-Franco et al. 2024)(Talla et al. 2021). Estas categorías fueron seleccionadas por su relevancia tecnológica y por cubrir un amplio rango de propiedades mecánicas, desde soluciones sostenibles y de bajo costo hasta diseños de alto rendimiento. De esta manera, esta revisión analiza y compara los principales materiales empleados en el diseño de prótesis ESAR, identificando sus ventajas, limitaciones y tendencias de aplicación (Van Tuan et al. 2017)(Al Thahabi et al. 2025).

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica sistemática y comparativa, cuyo propósito fue analizar el estado actual de los diseños de prótesis de pie tipo Energy Storage and Return (ESR) en función de los materiales empleados, las configuraciones geométricas y los métodos de validación. Este estudio permitió integrar y comparar los avances más relevantes en materia de rigidez, retorno de energía y desempeño mecánico.

2.1 Estrategia de búsqueda bibliográfica

Se implementó una búsqueda estructurada en bases de datos científicas de alto impacto Scopus, ScienceDirect, Springer, IEEE Xplore y Google Scholar empleando combinaciones de palabras clave en inglés y español tales como prosthetic foot, ESR, composite materials, carbón fiber, natural fibers, 3D printing, finite element análisis, experimental validation.

El rango temporal se estableció entre los 2010 y 2025, con el fin de incluir tanto desarrollos consolidados como propuestas emergentes basadas en impresión 3D. De una búsqueda inicial, se filtraron 32 artículos con información relevante; posteriormente, se seleccionaron 20 estudios, los cuales son trabajos que tienen información que cumplen con los criterios de inclusión y exclusión establecidos en el presente trabajo.

2.2 Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron artículos que:

1. Describen explícitamente los materiales utilizados.
2. Presentan validación mediante FEA, ensayos experimentales o clínicos.
3. Reportan propiedades mecánicas relevantes (rigidez, retorno de energía, resistencia).

Se excluyeron revisiones narrativas, y estudios sin ninguna validación.

Cada artículo seleccionado fue analizado para identificar sus principales ventajas y limitaciones. Posteriormente, la información se integró en la **Tabla 1**, que concentraron los datos esenciales de cada estudio. A partir de esta tabla se elaboraron dos gráficos comparativos, los cuales permiten observar de forma visual la influencia de las propiedades mecánicas de los materiales en la rigidez y el desempeño de las prótesis.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Influencia de los materiales en la rigidez de las prótesis

La **Figura 1** presenta un diagrama comparativo que clasifica el comportamiento mecánico de las prótesis de pie tipo Energy-Storing-and returning (ESR) en función de sus niveles de rigidez (media, alta y muy alta) y del tipo de material empleado en su fabricación.

Los materiales de muy alta rigidez se asocian a prótesis destinadas a actividades dinámicas o deportivas, mientras que los de rigidez media y alta se emplean en la marcha cotidiana.

Los resultados muestran que el nivel de rigidez alcanzado en cada prótesis está fuertemente relacionado con el tipo de material escogido para su diseño. A continuación, se describe este comportamiento:

- **Rigidez muy alta.** Las investigaciones muestran que este nivel de rigidez se obtiene principalmente en prótesis fabricadas con materiales compuestos reforzados con fibra de carbono/epoxi ($E \geq 100\ GPa$).
- **Rigidez alta.** Se obtiene en prótesis construidas de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio/poliéster($E = 30\ a\ 80\ GPa$) o en materiales compuestos híbridos.
- **Rigidez media.** Se puede alcanzar en prótesis fabricadas con polímeros impresos en 3D ($E < 30$) o con materiales compuestos reforzados con fibras naturales.

Por lo tanto, estas relaciones entre la rigidez y el material permiten facilitar la selección del material más adecuado para el diseño de la prótesis según el perfil de actividad del usuario.

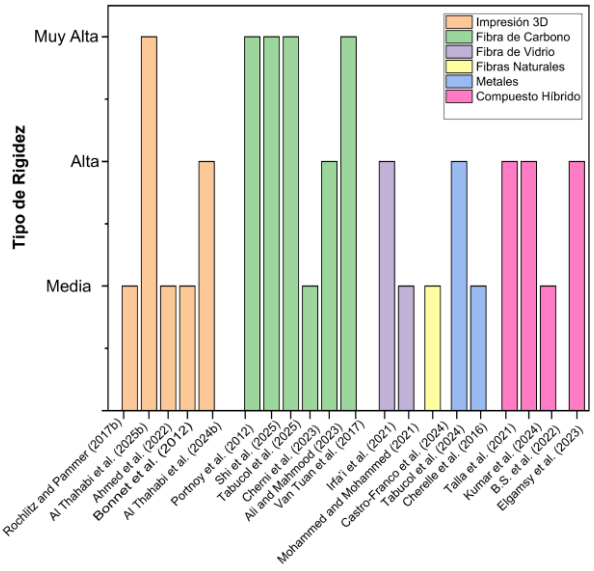


Figura 1. Nivel de rigidez de las prótesis reportadas en la literatura en función del tipo de material utilizado.

A continuación, se describirán las características más importantes de los materiales utilizados para la fabricación de prótesis. La fibra de carbono presenta los valores más altos de rigidez en las prótesis, cubriendo las categorías de alta y muy alta. Este comportamiento respalda su uso en aplicaciones que requieren alta resistencia y mínima deformación. Su elevada relación rigidez-peso la consolida como el material de referencia para prótesis de alto rendimiento, ya que permite almacenar energía durante la fase de apoyo y liberarla eficientemente en la fase de impulso, optimizando el retorno energético.

Por otro lado, la fibra de vidrio ofrece un equilibrio entre rigidez y costo, garantizando estabilidad estructural y retorno de energía adecuados para prótesis económicas. Con respecto a los metales, representados en la literatura son principalmente aceros y alecciones de aluminio, mantienen una categoría de rigidez elevada, aunque su peso reduce la eficiencia energética.

Por su parte, los compuestos híbridos (resinas reforzadas con fibra de vidrio o carbono) muestran rigidez intermedia y buen desempeño funcional, con menores costos y procesos de manufactura más simples. A su vez, las fibras naturales (kenaf, lino, cáñamo) se ubican en categorías intermedias y bajas de rigidez. Aunque su desempeño mecánico es menor, se destacan como alternativas sostenibles y ligeras, adecuadas para desarrollos experimentales o prótesis de bajo costo.

En cambio, en las prótesis fabricadas de materiales de impresión 3D, la rigidez varia ampliamente, desde niveles medios hasta altos. Esta dispersión depende del tipo de polímero (ABS, Onyx, PLA reforzado) y los parámetros de fabricación aditiva, como la orientación de capas, porcentaje de relleno y la incorporación de fibras continuas. En estos casos, la rigidez determina tanto la resistencia del prototipo como su durabilidad frente a cargas cíclicas. No obstante, en polímeros impresos se requiere más investigación para aumentar la rigidez, la resistencia y el rendimiento mecánico de las prótesis.

En síntesis, la rigidez es un parámetro critico en el diseño de prótesis tipo ESR: los valores muy bajos generan perdida de energía, mientras que niveles excesivamente altos deben equilibrarse con el peso y la comodidad del usuario.

Tabla 1. Comparación de materiales y desempeño en prótesis tipo ESR

Autores/ Año	Material utilizado	Ventajas principales	Desventajas principales	Rigidez
(Rochlitz and Pammer 2017a)	ABS (impresión 3D)	Bajo costo Fabricación accesible Buen retorno energético (88%)	Baja resistencia mecánica No apto para actividad alta Sin validación clínica	Media
(Al Thahabi et al. 2025)	Onyx con refuerzo de fibra continua	Alta personalización estructural Retorno energético alto	No valido experimentalmente Dependiente del modelo FEA	Muy Alta
(Portnoy et al. 2012)	Fibra de carbono (curado en autoclave)	Validacion completa (FEA,ISO,clinica) Mejora del 25% sobre modelos comerciales	Costo alto de manufactura Requiere equipamiento especializado	Media
(Shi et al. 2025)	Fibra de carbono	Evaluación real en usuario Resultado cinemáticos y energéticos detallados	Resultados sujetos a variabilidad individual Número limitado de participantes	Media
(Irfa'i et al. 2021)	Poliester + fibra de vidrio / carbono	Evaluación detallada de orientaciones de fibra Alternativa económica viable	No incluye diseño completo de prótesis ni validación funcional	Alta
(Castro-Franco et al. 2024)	Fibras naturales (kenaf, lino, cañamo, balsamo)	Enfoque sostenible Buena respuesta mecanica en simulaciones	No incluye validación clínica Desempeño inferior a la fibra de carbono	Muy alta
(Tabucol et al. 2024)	Aleaciones, polímeros, actuadores para rigidez variable	Ajuste dinámico Pruebas clínicas Personalización del desempeño	Aun en desarrollo Ajuste manual Dependencia de electrónica compleja	Muy alta
(Ahmed et al. 2022)	Termoplástico poliuretano (TPU, IMPRESIÓN 3D)	Diseño económico Eficiencia energética ~0.044 J/kg Validación FEA	Menor rigidez que la fibra de carbono Sin validación clínica	Media
(Bonnet et al. 2012)	Poliuretano (modelo FEA con geometría real)	Simulación precisa con cargas realistas Identifica zonas criticas	Sin validación experimental Sin prototipo físico	Alta
(Al Thahabi et al. 2024)	Onyx + fibra continua (impresión 3D compuesta)	Diseño optimizado por rigidez Fabricación rápida simulación precisa	No incluye validación clínica Propiedades mecánicas dependen de impresión	Muy alta
(Tabucol et al. 2025)	Fibra de carbono prepreg + mecanismo de leva	Rigidez ajustable Validación clínica Mejora en adaptabilidad funcional	Ajuste manual Limitado a condiciones mecánicas Sin automatización electrónica	Alta
(Cherelle et al. 2016)	Acero + aleación+ mecanismo crank-slider (biela-manivela)	Diseño innovador con mecanismo compliant crank-slider Análisis estructural y funcional Validación experimental con usuarios	Complejidad mecánica Requiere ensamblaje preciso Mayor costo de prototipado	Alta
(Mohammed and Mohammed 2021)	Fibra de vidrio + resina poliester	Buena dorsiflexión Fabricación económica Validación experimental y FEA	No validación clínica en usuarios Estructura simple	Alta
(Cherni et al. 2023)	Pylon modular con sensor de marcha y análisis adaptativo	Análisis cuantitativo de la marcha con diferentes tipos de prótesis	Estudio de caso Resultados no generalizables	Media
(Talla et al. 2021)	PMMA + UHMWPE + fibra de carbono / vidrio	Evaluación numérica y experimental Laminados comparativos Mejora con carbono	Sin validación clínica Enfoque limitado a atletas	Alta
(Ali and Mahmood 2023)	Poliuretano reforzado con fibra de carbono	Evaluación experimental y dinámica de la prótesis con resultados funcionales reales	No incluye validación clínica Ni comparación con prótesis comerciales existentes	Alta
(Kumar et al. 2024)	Compuesto con refuerzo en capas orientadas	Diseño optimizado por FEM Respuesta mecánica variable	No incluye validación clínica Ni estudio en usuarios reales	Media
(Elgamsy et al. 2023)	Modelo hibrido de datos clínicos + simulación física	Predicción precisa del comportamiento de la prótesis Diseño personalizado Aplicabilidad clínica	Requiere datos de alta calidad Validación limitada en población amplia	Alta
(Van Tuan et al. 2017)	Compuestos comerciales en prótesis modulares	Comparación entre tipos de prótesis en usuarios reales	Estudio de caso único Generalizado limitada	Alta
(B.S. et al. 2022)	Estructura de hueso biomimética	Reducción de error dinámico en trayectoria del pie	Alta complejidad computacional sin aplicación clínica directa	Media

3.2 Influencia de los materiales en el desempeño mecánico de las prótesis

En la **Figura 2** se compara el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción de los diferentes materiales empleados en prótesis tipo Energy-Storing-and-Returning (ESR), con base en los valores recopilados de los artículos analizados. Esta representación permite establecer una relación entre la rigidez estructural del material y su capacidad de resistencia antes de fallar. La interpretación de los resultados permite clasificar los materiales en tres grupos en función de su desempeño mecánico:

- **Materiales de muy alto desempeño (E≥100 GPa, σ_u ≥600 MPa).** Se incluye los materiales compuestos de fibra de carbono/epoxi (Portnoy et al. 2012);(Al Thahabi et al. 2024);(Tabucol et al. 2025). Este material ofrece una alta resistencia y una mínima deformación, aunque con costos y requerimientos de manufactura elevados.
- **Materiales de alto desempeño (E=30-80 GPa, σ_u=300-600 MPa).** Se incluyen los compuestos de fibra de vidrio/poliéster (Irfa'i et al. 2021), compuestos híbridos (Talla et al. 2021);(Kumar et al. 2024)(Elgamsy et al. 2023) y ciertos metales. Estos materiales mantienen el equilibrio entre rigidez y resistencia, adecuados para la marcha cotidiana y actividades moderadas.
- **Materiales de medio desempeño (E<30 GPa, σ_u<300 MPa):** Se incluyen los polímeros ABS, TPU, y Poliuretano (Rochlitz and Pammer 2017b),(Ahmed et al. 2022)(Bonnet et al. 2012). Además, las fibras naturales (Castro-Franco et al. 2024). Los materiales poliméricos priorizan la flexibilidad y absorción de impactos, siendo idóneos para prótesis de rehabilitación o bajo nivel de actividad, aunque su resistencia mecánica es limitada.

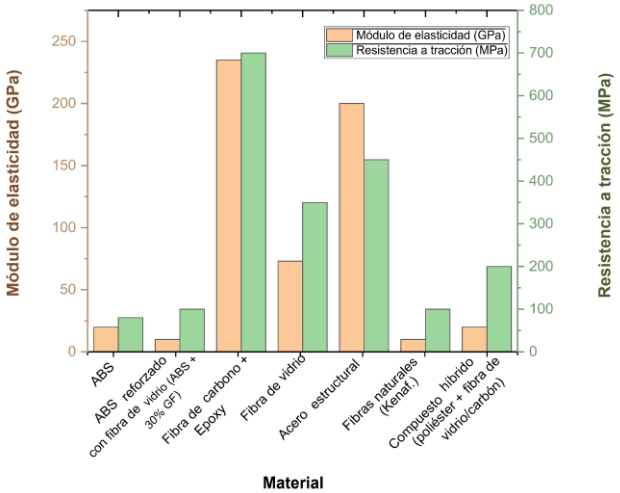


Figura 2. Propiedades mecánicas de los materiales más utilizados en el diseño de prótesis.

Estos grupos de desempeño permiten comprender la importancia de las propiedades mecánicas de los materiales en la prótesis. A continuación, se detalla esta importancia a través de las investigaciones reportadas en la literatura.

En el contexto de los materiales compuestos fibra de carbono o fibra de vidrio, estos exhiben propiedades mecánicas más elevadas en comparación con los materiales poliméricos. Su combinación de alta rigidez y resistencia los hace ideales para maximizar el almacenamiento y retorno de energía durante la marcha. Por ejemplo, Al Thahabi et al. 2025 demostraron la viabilidad de manufacturar prótesis de fibra de carbono mediante impresión 3D, integrando ligereza, resistencia y funcionalidad biomecánica en un diseño protésico avanzado **Figura 4**. La orientación y secuencia de apilamiento de las fibras influyen directamente en su rendimiento, permitiendo a este compuesto ser la opción preferente para usuarios con mayores exigencias de actividad y durabilidad.

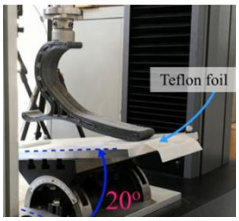


Figura 4. Prótesis de pie de material de fibra de carbono(Al Thahabi et al. 2025).

Por otro lado, dentro los materiales poliméricos el ABS constituye una alternativa balanceada entre personalización y funcionalidad. Por ejemplo, Rochlitz and Pammer 2017 demostraron esta ventaja al desarrollar una prótesis de pie con geometrías ergonómicas y estructurales complejas, ver Figura 3. La impresión 3D del ABS permite reducir peso, mejorar la eficiencia mecánica y adaptar el diseño a las necesidades morfológicas del usuario. Además, el ABS con 30% de fibra de vidrio puede incrementar significativamente la resistencia mecánica, confirmando que el refuerzo por fibras es una estrategia efectiva para optimizar polímeros en aplicaciones protésicas (Irfa'i et al. 2021). Este material compuesto representa un punto intermedio entre el desempeño de compuestos avanzados y la accesibilidad de los termoplásticos convencionales.

Figura 3. Prótesis de pie de material compuesto de fibra de vidrio (Mohammed and Mohammed 2021)

Con respecto a los metales, el acero estructural presenta un alto módulo de elasticidad y resistencia. Sin embargo, su elevada densidad limita su aplicación en dispositivos donde la ligereza es prioritaria. Un ejemplo destacado es el trabajo de Cherelle et al. 2016, quienes desarrollaron el "AMP-Foot 3" (ver, Figura 5), la cual es una nueva prótesis que incorpora componentes metálicos en su sistema de almacenamiento y liberación de energía. Este diseño tiene un sistema de levas y resortes que permite replicar movimientos dinámicos, como subir escalones o realizar impulsos rápidos. La elección de aleaciones metálicas en zonas críticas permite soportar cargas cíclicas elevadas y mantener precisión dimensional. La validación experimental demostró que el dispositivo puede almacenar hasta 92% de la energía durante la fase de apoyo y liberarla en la propulsión.

Figura 5. Prótesis de pie de material metálico (Tabucol et al. 2025)

Por último, los materiales de origen natural, como el lino y el kenaf, junto con los compuestos híbridos, se perfilan como alternativas sostenibles frente a los refuerzos sintéticos. No obstante, presentan desafíos técnicos relevantes, como la heterogeneidad de sus propiedades, la alta absorción de humedad y la sensibilidad térmica, factores que pueden afectar la estabilidad estructural y la durabilidad. Aún con estas limitaciones, las fibras naturales permiten desarrollar prótesis ligeras, ecológicas y funcionales, constituyendo una alternativa viable para usuarios con requerimientos moderados y énfasis en sostenibilidad ambiental.

4. CONCLUSIONES

La revisión de la literatura sobre el diseño de prótesis de pie permitió encontrar que la necesidad actual es la búsqueda de replicar la biomecánica de la marcha humana. En esta búsqueda se han desarrollado materiales y técnicas de fabricación, nuevos diseños buscando optimizar la rigidez, la absorción de energía, y la adaptabilidad biomecánica del usuario.

En este contexto, los materiales compuestos de fibra de carbono son los mayormente utilizados por su excelente relación resistencia-peso y su buena capacidad de almacenamiento y restitución de energía. Sin embargo, su alto costo de materiales y manufactura limitan su accesibilidad en entornos socioeconómicos vulnerables. Frente a esta limitación, han emergido alternativas prometedoras como los polímeros impresos en 3D (ABS) y los compuestos de poliéster reforzado con fibra de vidrio, que priorizan la accesibilidad económica y la rapidez de prototipado. No obstante, estas soluciones demandan mayor investigación para superar sus limitaciones actuales en rigidez, resistencia mecánica y durabilidad ante condiciones de alta exigencia.

El panorama a futuro sugiere que el diseño de las prótesis de pie debe contemplar un enfoque sinérgico entre la ciencia de materiales, la ingeniería de manufactura y la biomecánica clínica, que permita materializar el equilibrio entre accesibilidad universal, durabilidad estructural y calidad biomecánica en las prótesis de nueva generación.

5. AGRADECIMIENTOS

Sandra Yaraset Vara Salas agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo otorgado a través de la beca No. CVU 2026932 y hacer lo posible un posgrado.

REFERENCIAS

Ahmed, M.H. et al. 2022. 3D Printable Thermoplastic Polyurethane Energy Efficient Passive Foot. *3D Printing and Additive Manufacturing* 9(6), pp. 557–565. doi: 10.1089/3dp.2021.0022.

Ali, S.M. and Mahmood, S.S. 2023. Design and Manufacturing of a Low-Cost Prosthetic Foot. *Ingenieria e Investigacion* 43(3). doi: 10.15446/ing.investig.98916.

Bonnet, X., Pillet, H., Fodé, P., Lavaste, F. and Skalli, W. 2012. Finite element modelling of an energy-storing prosthetic foot during the stance phase of transtibial amputee gait. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. pp. 70–75. doi: 10.1177/0954411911429534.

B.S., V., Thinlay, T., Jayswal, S.K., Pradeep, S., Bais, M., Prasad, K.D. and Singh, J.I.P. 2022. Design and structural analysis of a passive ankle-foot prosthesis with manually adjustable stiffness and having two degrees of freedom. *Materials Today: Proceedings* 65, pp. 3496–3505. doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.086.

Castro-Franco, A.D., Siqueiros-Hernández, M., García-Angel, V., Mendoza-Muñoz, I., Vargas-Osuna, L.E. and Magaña-Almaguer, H.D. 2024. A Review of Natural Fiber-Reinforced Composites for Lower-Limb Prosthetic Designs. *Polymers 2024, Vol. 16, Page 1293* 16(9), p. 1293. Available at: https://www.mdpi.com/2073-4360/16/9/1293/htm [Accessed: 21 March 2025].

Cherelle, P., Grosu, V., Cestari, M., Vanderborght, B. and Lefeber, D. 2016. The AMP-Foot 3, new generation propulsive prosthetic feet with explosive motion characteristics: Design and validation. *BioMedical Engineering Online* 15. doi: 10.1186/s12938-016-0285-8.

Cherni, Y., Laurendeau, S., Robert, M. and Turcot, K. 2023. The Influence of Transtibial Prosthesis Type on Lower-Body Gait Adaptation: A Case Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(1). doi: 10.3390/ijerph20010439.

Elgamsy, R., Awad, M.I., Ramadan, N., Amer, A., Osama, Y., El-hilaly, R. and Elsabbagh, A. 2023. Localization of composite prosthetic feet: manufacturing processes and production guidelines. *Scientific Reports* 13(1). doi: 10.1038/s41598-023-44008-7.

Irfa'i, M.A., Dzulkiflih, Ismail, R. and Ganda, A.N.F. 2021. Effect of the orientation carbon-glass fiber reinforced polyester composite on bending strength for runner foot prosthesis applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1034(1), p. 012147. doi: 10.1088/1757-899x/1034/1/012147.

Kumar, S., Chandramohan, S. and Sujatha, S. 2024. Geometric optimization of magnetorheological damper for prosthetic ankles using artificial neural networks. *Mechatronics* 98. doi: 10.1016/j.mechatronics.2023.103108.

Mohammed, S.K. and Mohammed, A.K. 2021. Design and Manufacturing of a New Prosthetic Foot. *Journal port Science Research Available online www.jport.co* 4(2), pp. 118–124. Available at: https://doi.org/10.36371/port.2021.2.8.

Portnoy, S., Kristal, A., Gefen, A. and Siev-Ner, I. 2012. Outdoor dynamic subject-specific evaluation of internal stresses in the residual limb: Hydraulic energy-stored prosthetic foot compared to conventional energy-stored prosthetic feet. *Gait and Posture* 35(1), pp. 121–125. doi: 10.1016/j.gaitpost.2011.08.021.

Rochlitz, B. and Pammer, D. 2017a. Design and analysis of 3D printable foot prosthesis. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 61(4), pp. 282–287. doi: 10.3311/PPme.11085.
Shi, Q.Q., Yick, K.L., Li, C.H., Tse, C.Y. and Hui, C.H. 2025. Biomechanical Evaluation of Elliptical Leaf Spring Prosthetics for Unilateral Transtibial Amputees During Dynamic Activities. *Technologies* 13(4). doi: 10.3390/technologies13040129.

Tabucol, J. et al. 2025. The MyFlex-ζ Foot: A Variable Stiffness ESR Ankle-Foot Prosthesis. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 33, pp. 653–663. doi: 10.1109/TNSRE.2025.3534096.

Talla, H.K., Oleiwi, J.K. and Hassan, A.K.F. 2021. Performance of athletic prosthetic feet made of various composite materials with pmma matrix: numerical and theoretical study. *Revue des Composites et des Materiaux Avances* 31(4), pp. 257–264. doi: 10.18280/rcma.310410.

Al Thahabi, A.R.N. et al. 2025a. Numerical design and experimental validation of a 3D-printed composite energy-storage-and-return prosthetic foot. *Composite Structures* 358. doi: 10.1016/j.compstruct.2025.118907.

Al Thahabi, A.R.N., Martulli, L.M., Sorrentino, A., Lavorgna, M., Gruppioni, E. and Bernasconi, A. 2024a. Stiffness-driven design and optimization of a 3D-printed composite prosthetic foot: A beam finite Element-Based framework. *Composite Structures* 337. doi: 10.1016/j.compstruct.2024.118053.

Van Tuan, L., Ohnishi, K., Otsuka, H., Agarie, Y., Yamamoto, S. and Hanafusa, A. 2017. Finite element analysis for the estimation of the ground reaction force and pressure beneath the foot prosthesis during the gait of transfemoral patients. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering* 33, pp. 1–11. doi: 10.4028/www.scientific.net/JBBBE.33.1.

Detection of the *Varroa Destructor* Mite through Computer Vision in *Apis Mellifera*

Daniel Mauricio Matías-García*. Mireya Moreno-Lucio*. Celina Lizeth Castañeda-Miranda*. Luis Octavio Solis-Sánchez*. Luis Eduardo Bañuelos-García. Carlos Alberto Olvera-Olvera*****

**Laboratorio de Sistemas Inteligentes de Vision Artificial, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autonóma de Zacatecas, Zacatecas 98000 MEX (e-mail: maomatias1011gmail.com, mireya.moreno@uaz.edu.mx, celina@uaz.edu.mx, lsolis@uaz.edu.mx).*

***Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autonóma de Zacatecas, Zacatecas 98000 MEX (e-mail: luis.baniuelos@uaz.edu.mx).*

**** Laboratorio de Invenciones Aplicadas a la Industria (LIAI), Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autonóma de Zacatecas, Zacatecas 98000 MEX (e-mail: colvera@uaz.edu.mx).*

Abstract: This paper presents a proposal for the non-invasive detection of the Varroa Destructor mite in honeybees (Apis mellifera) using artificial vision. Which aims to identify this parasite with the use of image processing through features such as color and shape. The methodology includes the acquisition of images captured in honeybee hives from various bibliographies, the development of a code in the MATLAB R2024b software which allows chromatic segmentation, a morphological analysis and visual tests with the acquired reference images. The preliminary results show a favorable detection, which differs from the compatible regions where the mite is present. It is hoped that this work can be a tool for beekeeping, contributing to the timely detection of infestations and thus reducing the use of chemical and invasive methods to improve the sustainability of this sector.

Keywords: *Varroa Destructor, Apis Mellifera*, Artificial vision, Image processing

1. INTRODUCTION

Bees play a fundamental role in the balance of ecology, because they are among the world's main pollinators. Their work is of great importance in the production of foodstuffs. Without them, 35% of the food consumed in the world would be at risk, which would have a serious impact on food security (Enrique et al., 2012).

Beekeeping faces major challenges due to the infestation of Varroa Destructor, a parasitic mite that directly affects honeybees, reducing productivity in hives and in the worst case causing the death of entire colonies (Ogihara et al., 2020).

Currently conventional methods for detecting mite include manual visual inspections and the use of chemical agents, which become invasive, deadly and cannot be unpractical or accurate for large-scale use (Ogihara et al., 2020). Instead, the use of artificial vision technology may offer a more efficient, non-invasive and non-lethal solution, allowing analysis in hives without interrupting their natural activity. However, to date there are limitations in the progress in this field, and most studies make detections and analyses of other types of pests or diseases, leaving a space in the use of these tools and technologies for the identification of specific Varroa Destructor (Noble et al., 2021).

Recent studies, such as that of Duma (Duma et al., 2024), have made use of artificial vision for the detection of this mite, using a sample of dead infested bees, which demonstrates the potential of this technology for detecting this mite (Su et al., 2026).

Early detection of the Varroa Destructor mite will not only provide a tool for pest control, but it is also expected to contribute to the health and sustainability of bees by reducing the use of invasive and deadly chemical methods and thus improving the efficiency of the beekeeping sector.

Therefore, this document seeks to address a crucial need in the management of modern beekeeping, offering an innovative technological solution that can overcome the shortcomings and limitations of existing methods and bring new possibilities for pest control in bees through artificial vision techniques, as is the color segmentation in the HSV space to identify regions that correspond to the mite and complement with morphological operations to be able to make the most accurate detection eliminated noise or false positives and improve your binary mascara. In addition, analysis methods were used and composite images are created where the area of interest is highlighted on a grayscale background for easy visualization.

2. METHODOLOGY

As part of this research, an analysis of digital images of honeybees (Apis mellifera) with the presence of Varroa destructor was carried out in order to be detected using artificial vision techniques implemented in the MATLAB R2024b software. For this purpose, two complementary procedures were carried out. In both cases, detection comparison analyses were performed using different HUE

tolerance margins (0.02, 0.05 and 0.08), evaluating the results obtained with and without morphological operations to determine the sensitivity and robustness of the codes.

The first procedure involves a manual selection and generation of adaptive HSV ranges, making use of an interactive tool in MATLAB R2024b, to classify the mite color using the function called impixel. The values obtained from RGB were normalized and converted to HSV, calculated the minimum and maximum scale of H, S and V with tolerance margins of 0.03 for Hue, 0.10 for Saturation and 0.10 for Value, in order to include tone variability. For example, if the minimum and maximum pitch values were 0.02 and 0.03, the range obtained would be from 0 to 0.06. With these ranges, the corresponding binary mask was generated, and hole-filling operations were applied using the fill function, as well as discarding objects smaller than 60 pixels with the bwareaopen tool.

For the second procedure, which corresponds to an automatic segmentation in the HSV space, each image was loaded and normalized to a range [0,1] with the im2double tool. Subsequently the image passes from RGB to HSV, separating its three channels, Hue, which in MATLAB R2024b ranges between 0 and 1 (0 and 1 correspond to red, 0.33 to green and 0.66 to blue), Saturation, which represents the intensity of the color and Value, which indicates the brightness. Ranges were defined specifically to be able to detect reddish regions associated with the color of the mite body, setting Hue from 0 to 0.5 and 0.95 to 1.0, Saturation greater than 0.2 and Value greater than 0.2, creating the binary mask by logical comparison. To reduce noise and improve segmentation, morphological operations of opening and closing were used, using disc or oval shaped elements with radii of 2 and 4 pixels respectively. Finally, a composite image was created in which the regions that were detected as red remained in color and the rest of the image was changed to grayscale, thus visually highlighting areas of interest for analysis and detection. All this methodology can be seen graphically in the flow diagram below (Figure 1).

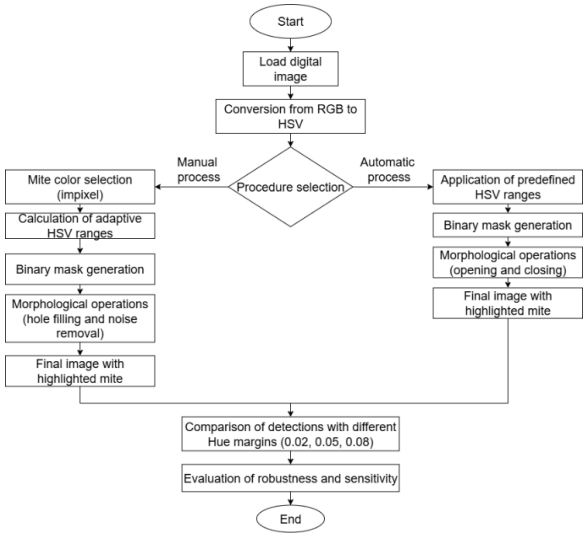


Figure 1. Flowchart of the methodology.

3. RESULTS

This section presents the results obtained by applying both methods of detection of the Varroa Destructor mite implemented in MATLAB R2024b, which are segmentation by manual selection of mite samples and automatic segmentation based on color in the HSV space.

Figure 2 (Spikenard Farm, 2022) shows the original image of a bee with mite infestation, from which several points corresponding to the characteristic color of the mite were manually taken using the impixel tool.

Figure 2. Bee sample with presence of mite.

With these values the adaptive ranges of Hue, Saturation and Value were calculated to generate the initial mask shown in Figure 3. As we can see in the mask there is a low level of false detection areas which are called noise.

Figure 3. HSV mask based on the mite's color.

Subsequently, morphological operations were applied to fill holes and remove objects below 60 pixels, which resulted in the clean mask (Figure 4), where only a candidate region corresponding to the mite is detected, located on the chest of the bee in the original image.

Figure 4. Cleaned mask (HSV).

Figure 5 shows the results of the original image, where by programming and with the help of the clean mask, the bounding box tool was used on the white parts of the mask,

visually confirming that the detection corresponds exactly to the mite.

Figure 5. Regions detected as possible mites.

Figures 6 and 7 show the result of the automatic method. In this process a fixed range of Hue was implemented, for the detection of the red tones characteristic of the mite, having the intervals from 0 to 0.05 and from 0.95 to 1.0, with saturation thresholds > 0.2. Figure 6 shows the binary mask generated in this process, with the regions detected as red shown in white.

Figure 6. Red SV mask.

Subsequently, the composite image was created (Figure 7), where areas similar to the color of the mite remained in their original color and the rest were transformed into grayscale, visually highlighting the area corresponding to the mite, although due to the limitations of the digital image, a noticeable amount of noise is present.

Figure 7. Original image in grayscale with highlighted red areas.

The same two procedures were applied to a second test image (Figure 8) which also had presence of the mite Varroa Destructor on honeybees (Saucedo, 2019).

Figure 8. Second bee sample with presence of mite.

For the case of the manual selection method, the impixel tool was used again to identify the color values of the mite, from which adaptive ranges of Hue, Saturation and Value were calculated. With which the initial mask was generated (Figure 9), showing the regions of interest as other scattered.

Figure 9. HSV mask based on the mite's color

Subsequently, applying morphological operations to eliminate gaps smaller than 60 pixels and fill gaps, a clean mask was obtained (Figure 10), in which a single candidate region corresponding to the mite is clearly marked.

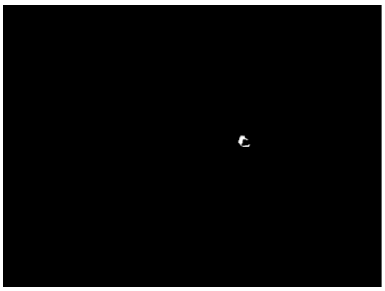


Figure 10. Cleaned mask (HSV).

In Figure 11 we see the results of the image where in the same way with the bounding box tool, we observe the exact detection of the mite.

Figure 11. Regions detected as possible mites.

Similarly, for the second image the automatic segmentation procedure was applied using the fixed ranges in the HSV space. In this process we defined specific Hue intervals between 0 and 0.5, as well as between 0.95 and 1.0, combined with Saturation thresholds greater than 0.2 and Value thresholds greater than 0.2, to be able to highlight the red tones of the mite. Thus creating the binary mask shown in Figure 12, showing the candidate regions.

Figure 12. Red SV mask.

Subsequently, the composite image was created (Figure 13), where similarly areas similar to the color of the mite remained in their original color and the rest were transformed into grayscale, highlighting the localization of the mite in the bee. As in the first image, the automatic method successfully detected the parasite, although some regions appeared as false positives.

Figure 13. Original image in grayscale with highlighted red areas.

Figures 14-16 show a sensitivity analysis of the Hue margin applied to the first image. As seen in the images, a Hue range of 0.02 yields more accurate mite detection with minimal noise. By increasing this margin to 0.05, it produces extra detections that do not correspond to the mite and with a margin of 0.08 false positives increase critically generating an excess of detected areas.

Figure 14. Sensitivity analysis – Image 1 Margin 0.02

Figure 15. Sensitivity analysis – Image 1 Margin 0.05

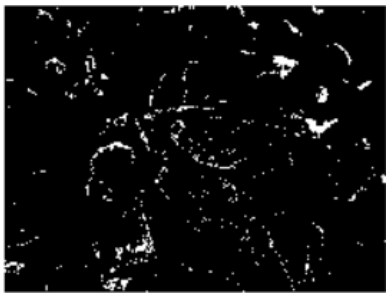


Figure 16. Sensitivity analysis – Image 1 Margin 0.08

Similarly we get the same results for the second test image (Figures 17-19).

Figure 17. Sensitivity analysis – Image 2 Margin 0.02

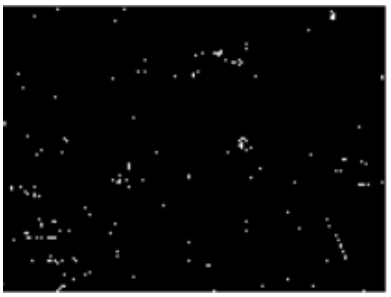


Figure 18. Sensitivity analysis – Image 2 Margin 0.05

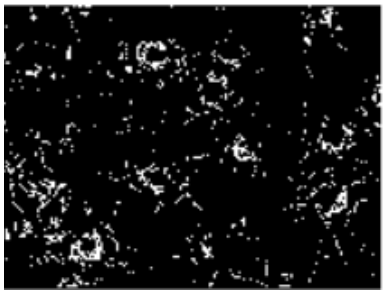


Figure 19. Sensitivity analysis – Image 2 Margin 0.08

Figures 20-22 show the results of applying morphological operations to analyses with different Hue margins from image 1, which helped significantly reduce noise and eliminate irrelevant objects and focus on regions of interest. In general these results show that with hue margin close to 0.002 and 0.05 together with morphological operations make an optimization for the accurate detection of the mite, minimizing the presence of other objects in the image.

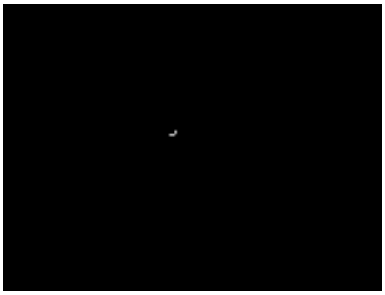


Figure 20. Morphological operations in the sensitivity analysis - Image 1 Margin 0.02

Figure 21. Morphological operations in the sensitivity analysis - Image 1 Margin 0.05

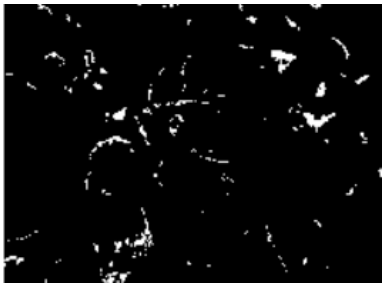


Figure 22. Morphological operations in the sensitivity analysis - Image 1 Margin 0.08

Similarly, figures 23-25 show the application of morphological operations to the second test image thus obtaining similar results in the 3 different margins.

Figure 23. Morphological operations in the sensitivity analysis - Image 2 Margin 0.02

Figure 24. Morphological operations in the sensitivity analysis - Image 2 Margin 0.05

Figure 25. Morphological operations in the sensitivity analysis - Image 2 Margin 0.08

Two metrics were integrated to seek to scale the analysis into practical applications, such as accuracy and a relative false positive rate ((FPRr) where the original mask obtained from both images of the manual method was compared because it was the one that got the best results, with the 3 different masks with their respective Hue margin, the results are shown in table 1 where we appreciate these metrics in a comparative way.

Table 1. Metrics

Image 1		
Hue: ±0.02	Precision = 0.98	FPRr = 0.00
Hue: ±0.05	Precision = 0.35	FPRr = 0.65
Hue: ±0.08	Precision = 0.10	FPRr = 0.90
Image 2		
Hue: ±0.02	Precision = 0.97	FPRr = 0.00
Hue: ±0.05	Precision = 0.70	FPRr = 0.20
Hue: ±0.08	Precision = 0.35	FPRr = 0.60

Both methods have advantages and disadvantages in terms of processing time, scalability and accuracy. In terms of processing time the automatic method has faster processing less than 2 seconds per image which is ideal for analyzing large volumes of data. For scalability, the manual method has the advantage of being a little more adaptable to different conditions; on the other hand, the automatic method has the advantage of being massively applicable, with the disadvantage that their performance is reduced by variability

in image quality or illumination. Finally, in terms of precision we could observe that the manual method has a high accuracy of about 90% on the other hand the automatic method has the disadvantage of having greater risk of false positives to 15-25%. In both cases, the use of morphological operations and the correct selection of Hue margins were of great importance for the optimization of results by reducing noise, consolidating regions of interest and improving overall detection accuracy. These results confirm the viability of using artificial vision as a non-invasive, non-lethal and promising tool for pest detection in hives, being a basis for support with this kind of systems for the beekeeping sector.

By comparison with the state of the art we have Duma's project (Duma et al., 2024), which uses image processing techniques, but with the difference that it uses spectral images of dead infested bee samples, although their method is precise and visually convincing using multivariate statistical analysis. Although the treatment of your images yields the correct detection of the mite, it has the disadvantage that you need to have an isolated sample of the hive and said lifeless sample. Another work is that of Bjerge (Bjerge et al., 2019) which makes a detection of the mite by means of monitory with video samples with deep neural networks, using a structure integrated to a hive in a more urban environment, although its method is precise, its processing to be with video is heavier and additional to that by incorporating that extension in the hive can generate stress to the bees since they are very sensitive to waves and signals that may cause components of it, therefore the method seen in this research compared to the aforementioned works seeks to acquire the images directly from the hive to alter as little as possible its natural activity and with a simpler approach, accessible and that can be reproduced using only RGB images converted to HSV. Compared to the published works, there is no need for advanced hardware, pre-training or expensive photography equipment, thus being more adaptable for a more economical and rapid implementation in experimental environments within the beekeeping sector.

4. CONCLUSION

The use of HSV spatial segmentation techniques allowed a precise and solid detection of the Varroa Destructor mite, distinguishing it from other reddish colors present in the test images. The main objective of this research is fulfilled by demonstrating that the artificial vision implemented in the MATLAB R2024b software integrates an effective tool for non-invasive, neither lethal detection of mite, thus avoiding the direct manipulation of hives and reducing stress on them. The results show us that the use of Hue margins enters 0.02 and 0.05 when combined with morphological operations, provides a balance between sensitivity and accuracy, giving reliable detection of mites, minimizing a false positive. In addition, it was noted that both procedures have advantages and disadvantages. Overall, the results of this research confirm that artificial vision may have a high potential to be a supporting tool for the sustainability of honeybee hive health, Contributing to more efficient management of sustainable beekeeping through the integration of technologies.

4.1 Limitations

The main limitation of this research lies in the lack of standardization of the images for their analysis, and that the images used showed variations in lighting, focus and angle, which impacts on the efficiency of the results obtained. It is expected to have a standardization of these for better processing. It is planned to expand the work in the future by using a database that collects both image detection results and values used for image segmentation, which has public and standardized data so that it is easy to handle and interpret.

REFERENCES

Duma, z.-s., zemcik, t., bilik, s., sihvonen, t., honec, p., reinikainen, s.-p., & horak, k. (2024). *Varroa Destructor* detection on honeybees using hyperspectral imagery. computers and electronics in agriculture, 224, 109219. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109219

Enrique, i. g., downing, a., javier, l. f., & castañeda, m. (2012). Patología, diagnóstico y control de las principales enfermedades y plagas de las abejas melíferas. editorial image yire, 6. Available at: https://atlasabejas.agricultura.gob.mx/pdfs/patologia_diagn_cntrl_enfrmdds_abejas_meliferas.pdf

Noble, n. i. i. i., stuhl, c., nesbit, m., woods, r., & ellis, j. d. (2021). A comparison of *Varroa Destructor* (acari: varroidae) collection methods and survivability in in vitro rearing systems. florida entomologist, 104(1), 13-17. Available at: https://doi.org/10.1653/024.104.0103

Ogihara, m. h., stoic, m., morimoto, n., yoshiyama, m., & kimura, k. (2020). A convenient method for detection of *Varroa Destructor* (acari: varroidae) using roasted soybean flour. applied entomology and zoology, 55(4), 429-433. Available at: https://doi.org/10.1007/s13355-020-00698-3

Saucedo, a. (2019). Condiciones poblacionales y alimenticias en colonias de *Apis Mellifera* tratadas contra *Varroa Destructor* en diferentes estaciones del año. Available at: https://doi.org/10.13140/rg.2.2.24781.46563

The varroa mite and biodynamic pest managementrecording – spikenard farm. (s. f.). retrieved on june 11, 2025. Available at: https://spikenardfarm.org/product/the-varroa-mite-2022/

Bjerge, k., frigaard, c. e., mikkelsen, p. h., nielsen, t. h., misbih, m., & kryger, p. (2019). a computer vision system to monitor the infestation level of *Varroa Destructor* in a honeybee colony. computers and electronics in agriculture, 164, 104898. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104898

Su, T.-S., Wu, C.-C., Lin, T.-Y., & Liu, C.-H. (2026). Beehive entrance imaging and deep learning for real-time monitoring of Varroa Destructor in apiculture. Journal of Invertebrate Pathology, 214, 108465. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jip.2025.108465

Experimental Evaluation of Recycled-Rubber-Modified Asphalt Mixtures for Sustainable Pavements

Amador Martínez María de Lourdes*

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, Apan Hidalgo; México. (e-mail: maria.am@otehidalgo.tecnm.mx).*

Abstract: The management of used tires is a major environmental challenge worldwide, with about 1.5 billion units generated annually. This study evaluates a hot-applied asphalt mixture modified with recycled tire rubber, known commercially as Asfalflex, for pothole repair and pavement maintenance. Laboratory tests were carried out at the Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, using three mixtures (1,250 g each) composed of 35% sand, 35% gravel, and 30% rubber, varying the asphalt content (7%, 8%, and 9%). Cohesion, homogeneity, compactability, and structural stability were analyzed through the Marshall method. The 7% asphalt mixture exhibited the best performance, showing approximately 15% higher stability and greater cohesion than the 8% and 9% mixtures. Higher asphalt contents reduced compactability and structural resistance. These findings confirm that the incorporation of recycled tire rubber enhances pavement durability, workability, and sustainability, contributing to circular economy practices and environmentally responsible road engineering.

Keywords: Recycled tire rubber; Asphalt mixtures; Sustainable Road construction; Durability; Environmental challenges; Marshall method; Waste management.

1. INTRODUCCIÓN

Las llantas usadas constituyen una de las corrientes de residuos sólidos más problemáticas a nivel mundial debido a su naturaleza no biodegradable y su volumen masivo de generación (Mohajerani et al., 2020). Con el crecimiento exponencial del parque automotor global, la gestión sostenible de estos residuos se ha convertido en una prioridad ambiental y económica. Este manuscrito analiza el uso adicional para el problema del desecho de llantas, examina las aplicaciones actuales del caucho reciclado de las llantas, y presenta una revisión comprehensiva de la literatura científica sobre su uso en construcción de carreteras e infraestructura.

La acumulación de desechos de caucho por sus propiedades de elasticidad y resistencia hacen que sea un producto casi insustituible, de tal modo que Peláez et al. (2017) dan a conocer que el uso del caucho como un recurso o materia prima de las empresas representó una cantidad de 28.9 toneladas para el año de 2014 y para el año 2015 este consumo de caucho aumentó en un 0.7% para el año 2016 y 2017 se estimó que el consumo seguiría incrementando hasta llegar a un consumo de 3.1% más a los años pasados.

De igual modo, los autores indican que de las 28.9 toneladas utilizadas anualmente en el año 2014 la proporción correspondiente al uso de caucho como materia prima para la fabricación de llantas representa entre un rango del 65% al 70% del total y anualmente la fabricación de llantas que se encuentran sin uso representa 17 toneladas, teniendo estancamiento o producción excesiva contemplando que dentro de la composición de una llanta solamente requiere entre el 41% y 55% de caucho del total de su constitución.

Los residuos y desechos de este material repercuten en problemas de salud humana, así como al medio ambiente afectando los suelos, el agua y el aire ya que se trata de un material que no es biodegradable y permanece en el planeta durante varios años, además de que en su composición cuenta con químicos que al recibir se desprenden como sustancias tóxicas.

Lo anterior, ha originado que los gobiernos implementen regulaciones para controlar la contaminación proveniente de este material iniciando prácticas en el país de Taiwán desde 1989 y expandiéndose hasta Estados Unidos, Japón y países europeos globalizando el seguimiento de regulaciones ambientales en los años 2000 para reciclar y gestionar el caucho, pero también darles otros usos a los residuos, situación que no se presenta directamente en México.

Derivado de las regulaciones, ahora el caucho de las llantas que no se utilizan, lo trituran para comercializarlo y darle otros usos siendo dentro de los más destacados la incineración mediante el caucho para producir calor, electricidad, vapor y como combustible para los hornos de cemento, dentro del área de construcción se utiliza para los asfaltos, carreteras, pisos para áreas con demasiada presión sobre ellos donde se exige más resistencia para el desarrollo de deportes, elemento clave como almohadillas o selladores en equipos industriales así-como la fabricación de calzado y herramientas.

1.1 Estadísticas Globales de Generación

La generación mundial de llantas usadas alcanza aproximadamente 1.5 mil millones de unidades anuales (Shams et al., 2025) representando un desafío logístico y ambiental de proporciones masivas. Esta cifra continúa

creciendo proporcionalmente con el aumento del parque vehicular global y la urbanización acelerada en países en desarrollo.

Por ejemplo, en los Estados Unidos, las estadísticas de 2011 indican que solamente el 10% de las llantas usadas se convierte en nuevos productos, mientras que más del 50% se destina a recuperación energética y el resto se elimina mediante disposición final en vertederos o métodos inadecuados (Alfayez, 2018). Esta distribución refleja la necesidad urgente de desarrollar aplicaciones de valor agregado para el caucho reciclado.

En este sentido, se sabe que la industria de la construcción vial enfrenta desafíos crecientes relacionados con la sostenibilidad ambiental, el agotamiento de recursos naturales y la necesidad de mejorar la durabilidad de la infraestructura. En este contexto, el desarrollo de tecnologías que permitan la reutilización de materiales de desecho mientras mejora el desempeño técnico de los pavimentos ha cobrado especial relevancia (Berman, 2023).

La incorporación de caucho de neumáticos reciclados en mezclas asfálticas ha emergido como una solución prometedora que aborda simultáneamente la gestión de residuos y la mejora de propiedades de pavimentos (Zhao y Yang, 2023). Los pavimentos asfálticos convencionales enfrentan limitaciones en su desempeño bajo condiciones de tráfico pesado y variaciones climáticas extremas. Las principales fallas incluyen deformación permanente, agrietamiento por fatiga y pérdida de adherencia (You, 2024). Estas deficiencias resultan en costos elevados de mantenimiento y reducción de la vida útil del pavimento, lo que genera impactos económicos y ambientales significativos (Bressi, 2025).

La modificación de asfaltos con caucho reciclado ofrece una alternativa técnicamente viable y ambientalmente responsable para mejorar el desempeño de pavimentos. Los estudios previos han demostrado que esta tecnología puede incrementar la elasticidad del ligante, mejorar la resistencia a la deformación permanente y extender la vida útil del pavimento (Zhang, 2019; Farina y Kutay, M. E. (2024).

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El asfalto modificado con caucho se define como una mezcla donde partículas de caucho provenientes de neumáticos reciclados son incorporadas al ligante asfáltico o a la mezcla de agregados para modificar sus propiedades viscoelásticas (Berman, 2023).

El crecimiento del parque vehicular y la consecuente generación de neumáticos fuera de uso representan uno de los mayores desafíos ambientales en el ámbito del transporte (Rondón et al., 2023). En México, se estima que anualmente se desechan más de 40 millones de llantas, de las cuales menos del 10% se reciclan (SEMARNAT, 2024). Frente a ello, la ingeniería vial busca alternativas sostenibles que reduzcan los impactos ambientales y extiendan la vida útil de las infraestructuras.
El uso de aditivos poliméricos, combinado con caucho reciclado, mejora las propiedades reológicas del ligante asfáltico y su resistencia a la fatiga y deformación (Gómez y Patiño, 2022). Este enfoque permite transformar un residuo contaminante en un componente funcional para la infraestructura vial, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9 y 12).
Diversas investigaciones han demostrado que la adición de caucho proveniente de neumáticos mejora la elasticidad y durabilidad del asfalto. Según Moreno et al. (2021) la incorporación de entre 5% y 15% de caucho incrementa la estabilidad y reduce la susceptibilidad térmica. Asimismo, Proietti y Magnani (2025) señalan que los asfaltos modificados con polímeros y caucho presentan mejor comportamiento ante cargas dinámicas y fisuras en carreteras que se encuentran funcionando cotidiano.
Por su parte, García y Hernández (2023) indican que el uso de un modificador elastomérico de base estireno-butadieno, permite una mejor compatibilidad entre el ligante asfáltico y el caucho, generando una mezcla más homogénea y resistente al envejecimiento. La eficiencia del aditivo se ha comprobado en obras de mantenimiento en países como Brasil y España, donde se ha logrado extender la vida útil de los pavimentos en un 25% (Ribeiro et al., 2022).
En México, estudios recientes impulsados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2024) recomiendan incorporar caucho en mezclas asfálticas por su contribución a la economía circular y la reducción de residuos sólidos urbanos. Sin embargo, aún existen desafíos técnicos relacionados con el control de la viscosidad y la homogeneidad del material durante el mezclado.

3. METODOLOGÍA

Las pruebas experimentales se realizaron el en el Laboratorio de Asfaltos del Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, como parte del proyecto “Carpeta asfáltica con caucho, Asfalflex”. El propósito de los ensayos fue evaluar la viabilidad y desempeño físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado, determinando el porcentaje óptimo de asfalto para su aplicación en obras de mantenimiento y bacheo.

Materiales

Para el proceso de pruebas en laboratorio, se emplearon las siguientes herramientas y materiales:

1. Recipientes para medir, como báscula, charolas para colocar y calentar los materiales, así como parrilla de gas.
2. Moldes cilíndricos de compactación para las mezclas, termómetro para la temperatura.
3. Material de protección como guantes, batas.
4. Asfalto líquido tipo convencional, calentado por baño María hasta alcanzar fluidez óptima.
5. Agregados pétreos: arena y grava en proporciones iguales.
6. Caucho reciclado triturado de neumáticos fuera de uso, con granulometría media.

7. Martillo Marshall

En la Figura 1 de materiales y proporciones utilizadas para la prueba se puede observar que de izquierda a derecha las porciones utilizadas, una vez medidas de arena, grava y caucho utilizado para la prueba experimental.

Figura 1. Material y proporciones utilizadas para la prueba.

Cada muestra tuvo un peso total de 1250 g, y se mantuvo constante la proporción de agregados: 35% arena, 35% grava y 30% caucho reciclado, variando únicamente el contenido de asfalto (7%, 8% y 9%).

Procedimiento experimental

El procedimiento seguido se detalla a continuación:

1. Pesado de materiales: se calcularon la masa de cada componente con base en el porcentaje asignado.
2. Calentamiento de agregados: Los agregados se calentaron a 160 °C para eliminar humedad.
3. Preparación del ligante: El asfalto se fluidificó mediante la técnica de baño María, para su incorporación a la mezcla de los agregados pétreos y el caucho granulado.
4. Integración de la mezcla: Se incorporó el asfalto a los agregados una vez obtenida la temperatura de 160 °C, manteniendo agitación constante para lograr homogeneidad entre los componentes, como se observa en la Figura 2, que muestra el asfalto la temperatura y la mezcla en el proceso de integración.
5. Moldeo y compactación: La mezcla se vertió en moldes cilíndricos y se compactó con el martillo Marshall, aplicando 100 golpes por cara.
6. Secado y desmoldeo: Tras la compactación, las probetas se dejaron enfriar y secar dentro del molde. Posteriormente, se extrajeron para su observación y registro de propiedades físicas.

Figura 2. Procedimiento de elaboración con la incorporación del asfalto y la temperatura.

Análisis

Las muestras elaboradas fueron comparadas en términos de textura, cohesión, consistencia, estabilidad estructural y homogeneidad, con el martillo Marshall. Se determinó la mezcla más viable considerando su firmeza al tacto, uniformidad y comportamiento tras el secado, en la Figura 3 se puede observar que se están integrando las mezclas, compactando y las pruebas de resistencia y posteriormente una mezcla que se sacó del molde.

Figure 3. Pruebas y resultado final de una muestra.

8. RESULTADOS

Los resultados de las tres mezclas se resumen en la Tabla 1, donde se presentan los porcentajes de asfalto, las masas calculadas para cada componente y las observaciones de desempeño.

Tabla 1. Resultados de mezclas asfálticas con caucho reciclado (1250 g totales)

No.	% Asfalto	Asfalto (g)	Arena (g)	Grava (g)	Caucho (g)	Observaciones
1	7%	87.5	406.9	406.9	348.8	Mezcla compacta, homogénea y estable tras secado.
2	8%	100.0	402.5	402.5	345.0	Mezcla aceptable, menor firmeza y cohesión.
3	9%	112.5	398.1	398.1	341.3	Exceso de ligante, baja resistencia estructural.

La Muestra 1 (7% de asfalto) mostró una textura uniforme, adecuada adherencia entre los agregados y el caucho, así como una mayor estabilidad al secado. La cohesión entre partículas fue evidente, lo que permitió una compactación óptima y ausencia de segregación del ligante.

Por el contrario, la Muestra 2 (8%) presentó una ligera disminución en firmeza y un comportamiento menos homogéneo, probablemente asociado al incremento de ligante, que generó zonas con exceso de fluidez durante la compactación.

La Muestra 3 (9%) evidenció exceso de asfalto, lo cual derivó en un material blando, con baja resistencia estructural y tendencia al desplazamiento del ligante en superficie.

En términos de desempeño visual y mecánico, la Muestra 1 se consideró la más adecuada para su aplicación práctica, ya que mantuvo un equilibrio entre la cantidad de ligante y la cohesión interna de los materiales, asegurando buena durabilidad, estabilidad y facilidad de manejo en campo.

Conclusión parcial de laboratorio

El análisis de las tres mezclas permitió identificar que el 7% de contenido asfáltico constituye la proporción óptima para la elaboración de carpetas asfálticas con caucho reciclado tipo Asfalflex, al proporcionar una mezcla estable, homogénea y de alta compactabilidad, recomendada para bacheo y secciones de prueba de pavimento.

Los resultados del ensayo de laboratorio indican que, dentro de la formulación evaluada (35% arena, 35% grava, 30% caucho reciclado y variación del contenido de ligante), el 7% de asfalto produjo la mezcla más equilibrada en términos de homogeneidad, compactabilidad y estabilidad tras el secado. Esta observación concuerda con la hipótesis de que, cuando se introduce un volumen considerable de material sólido no convencional (en este caso 30% de caucho triturado), el porcentaje de ligante debe ajustarse para mantener la cohesión inter-partículas y evitar la sobre lubricación del sistema.

Interpretación técnica de los hallazgos

Balance ligante-agregado-caucho: El desempeño superior de la Muestra 1 sugiere que 7% de asfalto permite un adecuado recubrimiento de las partículas (arena, grava y caucho) sin generar exceso de película bituminosa. En la Muestra 2 (8%) y, de forma más marcada, en la Muestra 3 (9%), el mayor contenido de ligante introdujo problemas de trabajabilidad y reducción de resistencia aparente, probablemente por formación de capas continuas de asfalto que favorecen la movilidad del ligante y reducen la fricción intergranular necesaria para ofrecer rigidez estructural.

Efecto del caucho en la estructura de la mezcla: La presencia del 30% de caucho modifica la porosidad efectiva y las zonas de contacto entre agregados: el caucho actúa como partícula deformable que demanda un recubrimiento controlado para integrarse sin quedar como zona de debilidad. Un exceso de ligante puede rellenar los huecos entre componentes deformables, reduciendo la fricción mecánica y la resistencia al esfuerzo, lo que explica la menor firmeza observada en Muestras 2 y 3.

Compactabilidad y respuesta al martillo Marshall: El buen comportamiento de la Muestra 1 frente a la compactación (100 golpes por cada cara) indica que la viscosidad y adhesión del sistema a 7% permitieron una compactación eficiente. El inadecuado asentamiento observado en Muestra 3 refuerza la idea de que el contenido de asfalto excedente dificulta la obtención de una estructura densa y homogénea.

En la Figura 4 se aprecian diferencias en la textura y homogeneidad de las mezclas realizadas, las últimas son después de permanecer a la intemperie, logrando mantenerse, y confirmándose que se aprecian diferencias en textura y homogeneidad; la mezcla al 7% muestra mayor compactabilidad y cohesión

Figure 4. Resultado final y duración con el tiempo.

5. DISCUSIÓN

Los resultados coinciden con lo reportado por Gómez y Patiño (2022), quienes destacaron que proporciones cercanas al 10% de caucho maximizan la resistencia sin comprometer la trabajabilidad. La mezcla M3 presentó un equilibrio óptimo entre rigidez y elasticidad, favoreciendo la resistencia a deformaciones plásticas y a la fatiga y ello es similar a la realizada del 7%.

El comportamiento decreciente de la mezcla puede atribuirse al exceso de caucho, que aumenta la viscosidad del ligante y dificulta la compactación (Moreno et al., 2021). Desde un punto de vista ambiental, la reutilización de neumáticos contribuye a reducir emisiones de CO_2 asociadas a la disposición final de residuos y disminuye la demanda de asfaltos vírgenes.

Estos hallazgos demuestran que la ingeniería vial sostenible puede incorporar materiales reciclados sin sacrificar el rendimiento estructural, siempre que se optimicen las proporciones y las condiciones de mezclado.

El desempeño superior de la muestra con 7% de asfalto demuestra que esta proporción permite un recubrimiento adecuado de los agregados y del caucho, evitando zonas de sobrelubricación. Este equilibrio es esencial en mezclas modificadas, donde la presencia del caucho altera la porosidad y el comportamiento viscoelástico del sistema (Moreno, López y Ruiz, 2021). Un incremento excesivo del ligante, como ocurrió en las muestras 2 y 3, tiende a generar zonas con exceso de fluidez durante la compactación, disminuyendo la cohesión interna y la resistencia estructural.

Asimismo, el caucho actúa como un material parcialmente deformable que absorbe parte de la energía de compactación y redistribuye esfuerzos, lo que requiere una cantidad precisa de asfalto para lograr una adhesión eficiente (Gómez & Patiño,

2022). El buen comportamiento de la mezcla al 7% de asfalto demuestra que el balance entre rigidez y elasticidad se mantuvo dentro de un rango favorable, permitiendo la obtención de una estructura densa y duradera tras la compactación con el martillo Marshall.

Los resultados concuerdan con lo reportado por Gómez y Patiño (2022), quienes identificaron que las mezclas modificadas con caucho presentan mejor desempeño con contenidos moderados de ligante, típicamente entre 6% y 8%, ya que porcentajes superiores generan una película bituminosa excesiva y reducen la estabilidad. De forma similar, Moreno et al. (2021) concluyeron que la adición de caucho entre 5% y 15% mejora la resistencia a la deformación, pero solo si el ligante no sobrepasa la saturación de los agregados.

Por su parte, García y Hernández (2023) señalan que el uso de aditivos elastoméricos como Asfalflex favorece la compatibilidad entre el caucho y el ligante asfáltico, incrementando la elasticidad y evitando la segregación de los componentes. Aunque el presente estudio no varió la proporción del aditivo, la homogeneidad visual observada en la mezcla sugiere que su efecto compatibilizante fue efectivo para lograr una distribución uniforme.

A nivel internacional, Ribeiro, Nunes y Alves (2022) y Proietti y Magnani (2025) reportaron incrementos de hasta 25% en la vida útil de pavimentos elaborados con asfalto-caucho y aditivos poliméricos, siempre que se mantenga un control riguroso de la temperatura (150–170 °C) y el tiempo de mezclado, condiciones semejantes a las seguidas en este estudio. Por lo tanto, los resultados locales son coherentes con las tendencias internacionales en ingeniería vial sostenible.

El desempeño obtenido sugiere que la mezcla con 7% de asfalto y 30% de caucho reciclado es adecuada para su aplicación en bacheo y mantenimiento de carreteras, donde se requiere una alta compactabilidad, resistencia al desprendimiento y estabilidad frente a variaciones térmicas. La formulación probada podría extenderse a carpetas de rodamiento o bases de prueba, siempre que se mantengan los parámetros térmicos y de compactación del laboratorio.

Además, el uso de caucho reciclado contribuye directamente a la reducción de residuos sólidos y emisiones de CO_2. De acuerdo con Rondón, Sánchez y Díaz (2023), cada tonelada de mezcla con 10% de caucho permite reciclar entre 10 y 12 neumáticos, evitando su disposición en tiraderos y disminuyendo el impacto ambiental del sector carretero.

6. CONCLUSIONES

El uso de una mezcla de pétreos, asfalto combinado con caucho reciclado representa una alternativa viable para la construcción y mantenimiento de pavimentos sostenibles. La mezcla con 7% de caucho ofreció los mejores resultados en estabilidad, resistencia al ahuellamiento y durabilidad, superando a las mezclas convencionales.

Además, la adopción de esta tecnología contribuye a la gestión ambiental responsable de los neumáticos fuera de uso, promoviendo una economía circular en el sector vial. Se recomienda continuar la investigación a escala piloto en carreteras reales, considerando análisis de costo-beneficio y desempeño a largo plazo bajo condiciones climáticas diversas. El presente estudio se realizó en escala de laboratorio, por lo que los resultados se limitan a condiciones controladas de temperatura, mezcla y compactación. No se efectuaron ensayos cuantitativos complementarios como módulo resiliente, ahuellamiento o fatiga, los cuales serían necesarios para validar el comportamiento estructural a largo plazo (IMT, 2024).

Se recomienda:

- Realizar ensayos de desempeño mecánico y durabilidad para caracterizar el comportamiento de la mezcla en condiciones de carga repetida.
- Ampliar la investigación a ensayos de campo o tramos piloto, para analizar la respuesta real del pavimento bajo tráfico y clima.
- Evaluar diferentes dosificaciones de Asfalflex y caucho, con el fin de determinar la región óptima de desempeño y costo-beneficio.
- Incorporar un análisis de ciclo de vida (ACV) para cuantificar los beneficios ambientales de la reutilización de neumáticos en mezclas asfálticas.

La evidencia empírica confirma que la mezcla asfáltica con 7% de asfalto y 30% de caucho reciclado presenta el mejor equilibrio entre estabilidad, compacidad y durabilidad, coincidiendo con lo descrito por autores recientes en el ámbito de la ingeniería vial sostenible. Esta formulación ofrece una opción técnica y ambientalmente viable para proyectos de mantenimiento carretero, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9 y 12, enfocados en innovación industrial y producción responsable.

REFERENCIAS

Alfayez, S. A. (2018). *Eco-Efficient Preplaced Recycled Aggregate Concrete Incorporating Recycled Tire Waste Rubber Granules and Steel Wire Fibre Reinforcement* [Master's thesis, Western University]. Electronic Thesis and Dissertation Repository. https://ir.lib.uwo.ca/etd/5488/

Berman, A. A. (2023). Evaluación de las características de sostenibilidad del hormigón asfáltico modificado. *En Serie Springer en Geomecánica y Geoingeniería* (págs. 1443-1454). https://doi.org/10.1007/978-981-19-7331-4_120

Bressi, S., Fiorentini, N., Huang, J. y Losa, M. (2019). Modificador de caucho granulado en pavimentos asfálticos de carreteras: *Estado del arte y estadísticas. Recubrimientos,* 9(6), 384. https://doi.org/10.3390/COATINGS9060384

García, L., y Hernández, J. (2023). Evaluación del desempeño de asfaltos modificados con polímeros elastoméricos. *Revista de Ingeniería Civil*, 29(3), 55–63.

Gómez, P., & Patiño, S. (2022). Influencia del caucho reciclado en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Territorio*, 14(2), 44–53.

Farina, A., Anctil, A., y Kutay, M. E. (2024). Crumb Rubber From End-of Life Tires to Reduce the Environmental Impact and Material Intensity of Road Pavements. *In Handbook of Sustainability Science in the Future* (pp. 1047 1086). https://doi.org/10.1002/9781394214297.ch44

Instituto Mexicano del Transporte (IMT). (2024). *Recomendaciones técnicas para el uso de caucho en mezclas asfálticas*. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.

Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *155,* 104679. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.104679

Moreno, D., López, F., & Ruiz, A. (2021). *Caracterización de asfaltos modificados con caucho de neumático triturado*. Revista de Materiales de Construcción, 73(340), 1–9.

Proietti, A., & Magnani, L. (2025). *Innovaciones en mezclas asfálticas sostenibles: estado del arte europeo*. Journal of Sustainable Transportation, 18(1), 22–38.

Peláez Arroyave, G. J., Velásquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. DOI: https://doi.org/10.18359/rcin.2143

Ribeiro, C., Nunes, P., & Alves, R. (2022). Performance of asphalt rubber pavements in Brazil: Long-term evaluation. *Construction and Building Materials*, 320, 126–139.

Rondón, J., Sánchez, C., & Díaz, M. (2023). Gestión ambiental de neumáticos fuera de uso en América Latina. *Revista Latinoamericana de Sostenibilidad,* 12(1), 15–27.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024). *Informe sobre residuos sólidos urbanos en México 2024*. Gobierno de México.

Shams, H., Ullah, H., Qiu, Y., Khan, M., Saleem, M. A., Khan, R., ... y Eldin, S. M. (2025). Investigación del rendimiento de pavimentos asfálticos modificados con asfalto recuperado y caucho granulado. *Informes científicos,* 15(1), 1709. https://doi.org/10.1038/s41598-025-17909-y

You, Z. (2024). Reciclaje de caucho de llantas de desecho en el diseño y construcción de pavimentos asfálticos. *En Manual de la ciencia de la sostenibilidad en el futuro* (págs. 1087-1108). https://doi.org/10.1002/9781394214297.ch46

Zhang, H. (2019). Asphalt and Asphalt Mixtures. *IntechOpen.* https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.80164

Zhao, W. F. y Yang, Q. (2023). Análisis del ciclo de vida de pavimentos sostenibles basado en la aplicación coordinada de pavimentos asfálticos reciclados y residuos sólidos: Medio ambiente y economía. *Revista de Producción Más Limpia*, 434, 140203. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140203

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Instituto el apoyo para la elaboración de este proyecto, al Tecnológico Nacional de México y en especial al Mtro. Felipe de Jesús Mancilla Arroyo.

Identification of Natural Enemies of *Diaphorina citri* in Citrus Fruits

Hernández-Hernández Eder Yosmar*, San-Juan-Martínez Alberta*, Casanova-Pérez Lorena,**

García-Alonso Florencia**

**Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense, Carr. Huejutla-Chalahuiyapa S/N, Col. Tepoxteco, C.P. 43000, Huejutla de Reyes, Hidalgo, México.*

(e-mail: {20220061, alberta.sanjuan}@uthh.edu.mx)

***Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense, Programa Educativo de Agrobiotecnología.*

(e-mail: {lorena.casanova, florencia.garcia}@uthh.edu.mx)

Abstract: Citrus farming is an agricultural activity of great economic importance, as it represents a significant source of income and employment for several people in the municipality of Jaltocan Hidalgo, Mexico. Citrus fruits are threatened by *Diaphorina citri*, a vector of the bacterium *Candidatus Liberibacter spp*., which causes HLB disease or yellow dragon, which attacks the vascular system of the plant and causes the gradual death of the tree. The identification of native natural enemies is important to evaluate the types of organisms found in the area and reduce the population index of this vector. Natural enemies of *Diaphorina citri* were identified in 5 locations: Amaxac I, Cuatecomaco, El Chote, Ahuayo, and Cuatzatzas, all belonging to the municipality of Jaltocan Hidalgo, Mexico. Sampling was carried out by placing 20 yellow sticky traps on 20 trees in each 1.5-hectare orchard at the cardinal point of the northwest, using the random method and inspecting the tree with a leaf area of 20 by 20 cm^3 every 15 days. Specimens captured during trapping were counted and insects were collected in glass jars with 70% ethanol for conservation. Subsequently, identification was carried out in the laboratory of the Agrobiotechnology educational program at the Technological University of the Huasteca Hidalguense. The presence of 10 different species of (*Coccinellidae*) Catarina was observed, in addition to (*Chrysopidae*) lacewings and eggs of this predator. The native species found in the municipality of Jaltocan are evident, to consider biological control as an alternative to combat *Diaphorina citri* in citrus crops.

Keywords: HLB, *Diaphorina citri, Candidatus Liberibacter spp., Coccinellida, Chrysopida*

1. INTRODUCCIÓN

En México, 23 estados se dedican a cultivar y cosechar cítricos, entre estos destacan, Veracruz, San Luis Potosí y Tamaulipas por su elevada producción. En el contexto nacional, con datos recientes del Panorama Agroalimentario del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), se identifica a Michoacán como el principal productor limonero, con 953 mil 652 toneladas; seguido de Veracruz, con 867 mil 916 toneladas; Colima, 312 mil 047 toneladas; Oaxaca, 300 mil 310 toneladas, y Tamaulipas, con 135 mil 886 toneladas. Yucatán, Jalisco, Tabasco, Guerrero y San Luis Potosí, también aportaron una cantidad significativa al volumen nacional (SADER, 2024).

El *Psìlido asiático* de los cítricos, *Diaphorina citri*, afecta a todas las especies de cítricos y se encuentra presente en todas las épocas del año (Luna-Cruz *et al*., 2018) además de ser el principal vector de la enfermedad denominada *huanglobing* o dragón amarillo. *Diaphorina citri* ocasiona serios perjuicios a las plantas de la familia Rutaceae, ya que tanto las ninfas como los adultos succionan grandes volúmenes de savia, lo cual favorece el desarrollo de fumagina en el follaje. Además, esta especie actúa como vector altamente eficiente de la enfermedad *huanglongbing*, considerada la más devastadora para los cítricos, ya que reduce de forma drástica la productividad y puede provocar la muerte total de las plantaciones en un lapso aproximado de cinco años (Alemán *et al*., 2007).

Diversas estrategias se han implementado para controlar tanto al insecto vector *Diaphorina citri,* como a la enfermedad del *huanglongbing*, incluyendo la eliminación de fuentes de infección, el control químico en viveros y plantaciones jóvenes, y el uso de enemigos naturales como arácnidos, crisópidos, sírfidos y especialmente coccinélidos, los cuales destacan por su eficacia depredadora (Alemán *et al*., 2007).

2. METODOLOGÍA

Búsqueda de literatura

Se consultaron artículos científicos en línea, páginas oficiales gubernamentales como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), además de la página oficial del municipio de Jaltocán, Hidalgo.

Localización geográfica de huertos en las localidades

Se utilizó *Google Maps* para la localización de huertos de las siguientes localidades: Amáxac I, Cuatecomaco, El Chote, Ahuayo y Cuatzatzas, todas pertenecientes al municipio de Jaltocan, Hgo.

Fig. 1. Ubicación geográfica de huertos

Instalación de trampas

Se instalaron 20 trampas adhesivas de color amarillo al azar en 20 árboles de cada huerta de 1,5 ha y cambiándolas cada 15 días, éstas se colocaron en dirección a las corrientes de aire en los puntos cardinales del norte al este (noroeste).

Monitoreo de trampas

Las trampas se revisaron cada 15 días. Se observó la presencia de enemigos naturales, inspeccionando cada árbol con base en la revisión de una superficie foliar de 20 por 20 cm^3 en cada punto cardinal del árbol y con una altura de 1.5 m.

Fig. 2. Revisión de trampas

Colecta de insectos

Se recolectaron insectos durante el trampeo, se contabilizaron y etiquetaron de acuerdo con la especie y se almacenaron en frascos de vidrio con etanol al 70% para preservarlos e identificarlos posteriormente en el laboratorio.

Identificación de insectos

La identificación de insectos fue realizada en el laboratorio del programa educativo de Agrobiotecnología de la Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense (UTHH). Se identificaron los insectos encontrados en cada huerto de cada localidad, observando directamente en un microscopio estereoscópico. Dichos insectos se clasificaron por orden y familia según la especie.

Fig. 3. Identificación de insectos

3. RESULTADOS

El estudio se llevó a cabo de mayo a julio de 2024 en huertos de naranja durante la etapa de fructificación. De total de huertos, 5 eran cultivados principalmente con naranja valencia y 2 huertos con naranja navel, dentro de estas huertas también se encontraron algunas plantas de mandarina, limón mexicano y naranja agría. Cada huerto contaba con una superficie aproximadamente de 1.5 a 2 ha.

La presencia de enemigos naturales se realizó visualmente inspeccionando al árbol con una superficie foliar de 20 por 20 cm^3 en cada punto cardinal del árbol y con una altura de 1.5 m. Durante el mes de mayo y a mediados de junio no se encontró una gran población de enemigos naturales, la ausencia de catarinitas (*Coccinellidae*) fue notable, cabe mencionar que durante estos meses las temperaturas sobrepasaron los 40 °C. La temperatura es un factor importante que influye en el tiempo de desarrollo del organismo y su fecundidad, pero además de la temperatura, también se debe considerar el tipo de alimento y su calidad nutricional (Pérez *et al*., 2016). La preferencia por alguna presa puede aumentar la fase reproductiva y fecundidad de los escarabajos, mientras que el consumo de alimentos no preferidos puede aumentar la fase no reproductiva.

Se observó que en esos meses igual disminuyó la población de *Diaphorina citri*, esto a consecuencia de que las plantas carecían de brotes tiernos que son fuente de alimento para esta plaga.

En cuanto la temperatura Rodríguez *et al*. (2018), mencionan que, en los parámetros reproductivos, las hembras de *Cycloneda sanguinea* a 25 °C alimentadas con pulgones de *Aonidiella aurantii* al cabo de una generación, es remplazada por 225 hijas.

Conforme las temperaturas fueron cambiando a mediados de junio y a principios de julio, cuando las lluvias comenzaron y las temperaturas descendieron a 26 °C aproximadamente, la población de enemigos naturales aumentó y se incrementó la presencia de depredadores como diversas especies de catarinas (*Coccinellidae*).

Como resultado de la exploración de los cinco huertos del municipio de Jaltocán, Hidalgo; se identificaron 10 especies diferentes de *Coccinellidae*, como se observa en la Figura 4.

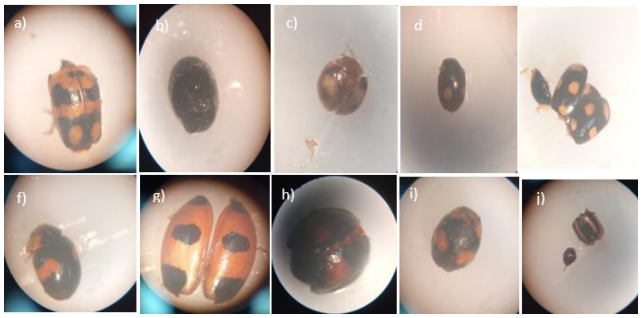


Fig. 4. a) *Rodolia cardinalis*, b) *Stethorus gilvifrons*, c) *Scymnus coccivora*, d) *Chilocorus stigma*, e) *Brachiacantha ursina*, f) *Brachiacantha dentipes*, g) *Coccinella*, h) *Chilocorus orbus*, i) *Scymnus latemaculatus*, j) *Hyperaspis quadrivittata*

Además, en el mes de mayo se encontró presencia de crisopas y huevecillos ovipositados en el envés de las hojas (*Chrysopidae*). El tiempo de incubación de las crisopas es de 6 a 7 días a una temperatura de 20 a 21 °C (Huerta, Díaz y Aragón, 2023), teniendo en cuenta esto es muy probable que los huevos no hayan eclosionado tras las temperaturas que se presentaron este mes, las cuales fueron superiores a 40 °C. Tal y como lo menciona García (2012), la temperatura juega un papel importante en el ciclo biológico, ya que de esta variable depende que las crisopas procreen varias generaciones al año en condiciones favorables.
La duración de fases de huevo, larva y pupa dependerá de la especie, siendo otro factor clave la alimentación por el tipo de presa que consuma y por las condiciones ambientales en las que se encuentre.

Es importante mencionar, *Ceraeochrysa valida*, fue la única especie que se encontró durante los tres meses de trampeo y exploración como también se puede verificar en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de especies identificadas en el municipio de Jaltocan.

Especies	Orden y familia	Mayo	Junio	Julio
Rodolia cardinalis	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	37	50
Stethorus gilvifrons	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	56	76
Scymnus coccivora	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	24	45
Chilocorus stigma	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	78	95
Brachiacantha ursina	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	35	40
Brachiacantha dentipes	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	44	78
Coccinella	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	88	65
Chilocorus orbus	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	38	70
Scymnus latemaculatus	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	22	99
Hyperaspis quadrivittata	Coleoptera: *Coccinellidae*	0	66	47
Ceraeochrysa valida	Neuroptera: *Chrysopidae*	5	0	0

Pacheco-Rueda *et al.* (2013) menciona que la especie *Ceraeochrysa valida* reproducida en condiciones controladas de 24 ± 2°C, humedad relativa de 60 a 65% y alimentado con ninfas de *Diaphorina citri*, presenta un ciclo biológico de huevo a adulto en 35 días, dato que permite evidenciar que debido a las altas temperaturas en los meses de mayo a julio en el municipio de Jaltocan, dicha especie no pudo completar su ciclo biológico (Figura 5).

Fig. 5. *Ceraeochrysa valida* y huevecillos ovipositados

La identificación de enemigos naturales de *Diaphorina citri* constituye un avance significativo en las estrategias de manejo biológico del Psìlido asiático, vector de *Candidatus Liberibacter spp*., agente causal de Huanglongbing (HLB). Los resultados obtenidos evidencian el potencial que ofrecen los organismos benéficos, como son los parasitoides y depredadores, que permiten reducir las poblaciones de esta plaga en condiciones de campo.

El aprovechamiento de estos agentes biológicos representa una herramienta clave dentro del manejo integrado de plagas (MIP), ya que contribuye a disminuir la dependencia del control químico y a mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana. A nivel industrial, el control biológico ofrece alcances considerables: promueve la sostenibilidad de los sistemas citrícolas, preserva la biodiversidad local y favorece la resiliencia ecológica de los agroecosistemas.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye que la modificación de la variable temperatura afecta la presencia de depredadores naturales de *Diaphorina citri*. Por lo tanto, en el diseño de estrategias del control biológico deberá considerarse como un elemento más la variabilidad climática, en particular, el aumento de la temperatura, la cual ocasionó en el área de estudio la disminución de la presencia de crisopas y catarinas, y que, en el caso de la crisopa, esta especie fue incapaz de terminar su ciclo biológico. Lo anterior requiere de más investigaciones que validen los resultados obtenidos en otros contextos específicos.

REFERENCIAS

Alemán, J., Baños, H. & Ravelo, J. (2007). Diaphorina citri y la enfermedad Huanglongbing: una combinación destructiva para la producción citrícola. *Protección Vegetal*. La Habana, 22 (3), pp.154-165. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1010-27522007000300003&script=sci_arttext&tlng=en [Accedido: 12 octubre 2025].

Contreras, M. & Argumedo, J. (2012). Identificación de enemigos naturales de *Diaphorina citri kuwayama (Hemiptera: Psyllidae)* en el estado de Yucatán, México. *Fitosanidad*, 16 81), pp. 5-11. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209125190004 [Accedido: 12 octubre 2025].

García-Ángel, O. (2012). *Efecto letal y subletal de insecticidas sobre diferentes instares de Chrysoperla carnea (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae)*. Tesis de licenciatura. Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Disponible en: http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/7058/Garc%C3%ADa%20%C3%81ngel%2C%20Omar%20%20Tesis%20Maestr%C3%ADa.pdf?sequence=3&isAllowed=y [Accedido: 12 octubre 2025].

Huerta-de la Peña, A., Díaz-Rivas, M.A. & Aragón-Sánchez, M. (2023). Parámetros poblacionales de *Chrysoperla* carnea en condiciones de laboratorio en Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(spe29), e3546. Disponible en: https://doi.org/10.29312/remexca.v14i29.3546 [Accedido: 12 octubre 2025].

Luna-Cruz, A., Escamilla-García, J.L., Barrera-Pardo, S.I., Loera-Alvarado, E. (2018). Fluctuación poblacional de *Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae)* en el Valle de Apatzingán, Michoacán. Disponible en: Acta Zoológica Mexicana (N.S.), 34(1), pp 1-4. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372018000100222 [Accedido: 12 octubre 2025].

Pacheco-Rueda, I., Lomeli-Flores, J.R., López-Arroyo, J.I., González-Hernández, H., Romero-Napoles, J., Santillán-Galicia, M.T., Súarez-Espinoza, J. (2015). Preferencia de tamaño de presa en seis especies de *Chrysopidae (Neuroptera)* sobre *Diaphorina citri (Hemiptera: Liviidae)*. *Revista Colombiana de Entomología*, 41(2), pp. 187-193. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-04882015000200007&lng=en&tlng=es [Accedido: 12 octubre 2025].

Palomares-Pérez, M., Ayala-Zermeño, M.A., Rodríguez-Vélez, B., de la Cruz-Llanas, J.J., Sánchez-González, J.A., Arredondo-Bernal, H.C. & Córdoba-Urtiz, E.G. (2016). Abundancia y depredación de *Ceraeochrysa* valid*a (Neuroptera: Chrysopidae*) sobre *Diaphorina citri (Hemiptera: Liviidae)* en Colima, México. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Science*s. 32 (3), pp.234-243. Disponible en: https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902016005000008.

Rodríguez-Palomera, M., Luna-Esquivel, G., Robles-Bermúdez, A., Coronado-Blanco, J.M., Cambero-Nava, K.G. & Cambero-Campos, O.J. (2019). Aspectos biológicos y parámetros poblacionales de *Cycloneda sanguínea L. (Coleoptera: Coccinellidae)* sobre *Aphis aurantii Boyer de Fonscolombe (Hemiptera: Aphididae)*. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(2), pp. 196-204. Disponible en: https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000305 [Accedido: 12 octubre 2025].

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (2024) *Ratifica México su posición como segundo productor y exportador mundial de limones y limas*. Disponible en: https://www.gob.mx/agricultura/prensa/ratifica-mexico-su-posicion-como-segundo-productor-y-exportador-mundial-de-limones-y-limas [Accedido: 12 octubre 2025].

Implementation of an Automated Integrated Waste Extraction and Lubrication System for CNC Machines

Rosas García, José Yahir *, García Enríquez, Irma Josefina*, Bautista Bautista, Alberto Nicolás*, Ávila Martínez, Carlos Enrique*, Núñez Dorantes, Juan Carlos*, Malagón González, Fernando*.

** Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, 94910*
(e-mail: 20223i101055@utcv.edu.mx, irma.garcia@utcv.edu.mx, alberto.bautista@utcv.edu.mx, carlos.avila@utcv.edu.mx, juan.nuñez@utcv.edu.mx, fernando.malagon@utcv.edu.mx).

Abstract: The primary objective of this research is to implement an integrated system for dust extraction and cutter lubrication in CNC routers to ensure operational efficiency, safety, and product quality. The initiative addresses critical machining issues such as residue accumulation from plastics, light metals, and wood, which affect performance and pose health risks, as well as cutter wear caused by friction that leads to premature degradation. The methodology follows a structured approach with six stages: defining objectives and requirements (residue types, volumes, and lubrication points), system design using CAD tools (Autodesk Inventor and Eagle), component acquisition (motors, ducts, PCBs), assembly of the extractor and lubrication system, integration into the CNC, and verification through pilot tests and parameter optimization. Results show substantial improvements. Before implementation, machining 1m × 1m plates generated 1.9 kg of plastic residues (95% coverage), 3.33 kg of light metals (82%), and 0.533 kg of wood (65%). After implementation, residues decreased to 0.266 kg (7%), 0.5 kg (10%), and 0.048 kg (3%), achieving efficiency gains of 86–91%. These outcomes improve workplace cleanliness, reduce health hazards such as respiratory problems from fine dust, extend tool life by minimizing friction and heat, and enhance part quality without deformation.

Keywords: CNC, waste extraction, lubrication, machining, automation

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y problemática

En la industria manufacturera moderna, las máquinas de control numérico por computadora (CNC) son fundamentales para producir piezas de alta precisión en materiales como plásticos, metales ligeros y madera. Sin embargo, el mecanizado genera residuos en forma de polvo fino y partículas volátiles que comprometen la calidad del producto, la durabilidad de las herramientas y la seguridad de los operadores. La acumulación de residuos, como el polvo inflamable de plásticos o el serrín de madera, puede causar fallos mecánicos y problemas de salud graves, como fibrosis pulmonar o cáncer nasal debido a la inhalación de partículas (Smith et al., 2019; Martínez y Torres, 2017). Además, la fricción excesiva por una lubricación inadecuada de la fresa incrementa el calor, provocando desgaste prematuro de herramientas y deformaciones en las piezas, lo que eleva los costos operativos y reduce la precisión.

El problema abordado en este estudio es la acumulación de residuos y la falta de sistemas automatizados de lubricación en routers CNC, lo que afecta la eficiencia, la seguridad laboral y la calidad del mecanizado. Este trabajo se enmarca en la ingeniería de sistemas y la automatización industrial, utilizando diseño asistido por computadora (CAD) y control electrónico para optimizar procesos.

1.2 Importancia del estudio

La relevancia de esta investigación radica en su impacto en la productividad, seguridad y sostenibilidad de la manufactura avanzada. Este estudio propone un sistema integrado de extracción de polvo y lubricación automatizada como una solución innovadora para optimizar el mantenimiento, mejorar la durabilidad de las herramientas y garantizar un entorno laboral más seguro. La integración de sistemas de extracción y lubricación aborda desafíos críticos identificados en estudios previos. Por ejemplo, Wang et al. (2020) demostraron que los sistemas de filtrado multicapa pueden capturar partículas de hasta 0.5 micrones, reduciendo riesgos ambientales. Asimismo, García y López (2021) señalaron que la lubricación automatizada prolonga la vida útil de las herramientas en un 30-40%, disminuyendo costos de mantenimiento. Estudios adicionales confirman que la lubricación controlada reduce significativamente el desgaste de las fresas (Zhao y Kim, 2018).”

Sin embargo, pocos trabajos integran ambos sistemas en una solución unificada y sincronizada con la CNC. Aunque existen sistemas comerciales de lubricación y de extracción de residuos, estos suelen ofrecerse como módulos independientes, sin coordinación directa con la trayectoria de corte. En este proyecto se optó por una modernización sobre la máquina existente, integrando ambas funciones en un solo sistema controlado, lo que resultó más económico y adaptable que la adquisición de equipo nuevo.

El desarrollo combinó modelado mecánico en Autodesk Inventor y diseño electrónico en Autodesk Eagle, avanzando hacia una solución integral que optimiza el rendimiento y cierra la brecha de soluciones integrales.

1.3 Alcance y resultados

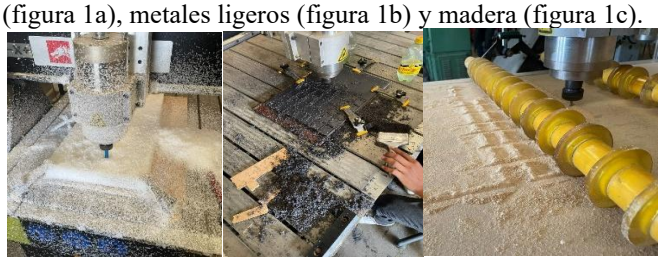
Se implementó un sistema integrado de extracción y lubricación para un router CNC, con diseño CAD en Autodesk Inventor, control con Arduino Nano y componentes en Nylamid y PETG. Las pruebas piloto mostraron reducciones de residuos del 85–91% y una mejor disipación térmica, mejorando la calidad del mecanizado. El sistema se valida como viable para uso industrial y con potencial de automatización completa.

2. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló siguiendo una metodología estructurada en las siguientes fases:

2.1 Identificación de residuos y puntos críticos de lubricación

En el mecanizado CNC, la acumulación de residuos y la lubricación inadecuada afectan la calidad, eficiencia y seguridad. Se identificaron tres tipos principales: plásticos (figura 1a), metales ligeros (figura 1b) y madera (figura 1c).



(a) (b) (c)

Fig. 1. Mecanizado de diferentes materiales

Tabla 1. Clasificación de residuos generados

Material	Forma del residuo	Riesgos principales	Volumen relativo
Plásticos	Polvo fino muy volátil	Inflamabilidad alta	Alto
Metales ligeros	Polvo fino	Daño respiratorio	Medio
Madera	Aserrín + materia volátil	Cáncer nasal/contaminación ambiental	Medio–alto

Esta clasificación permite definir requisitos del extractor:

- Alta capacidad de succión para plásticos (mayor volumen).
- Filtrado multicapa para separar materiales y evitar contaminación cruzada.
- Depósito amplio para aserrín de madera.
- Sincronización con CNC para activación automática o semiautomática.

Además, se identificaron zonas críticas de lubricación (fresa, engranajes, rieles, tornillos) para optimizar el rendimiento y prolongar la vida útil de las herramientas.

La falta de lubricación en la fresa provoca:

- Desgaste prematuro de la herramienta.
- Deformaciones en piezas por exceso de calor.
- Reducción de precisión en cortes y grabados.

El sistema diseñado incluye:

- Dosificación precisa del lubricante (evita exceso).
- Compatibilidad con plásticos, metales y madera.
- Automatización sincronizada con CNC, aplicando en los puntos críticos: fresas, guías lineales y tornillos de transmisión.

Tabla 2. Resumen comparativo de necesidades

Sistema	Requisito principal	Objetivo alcanzado
Extractor	Potencia ≥ 1.75 kW	Remoción eficiente de residuos y aire limpio
Filtrado	Multicapa	Separación de polvo fino y reciclabilidad
Lubricador	Dosificación precisa y automatizada	Reducción de desgaste y mejora del acabado

2.2 Diseño del sistema

En esta sección se detalla el diseño del sistema integrado de extracción de residuos y lubricación para el router CNC. Se modelaron soportes y base del extractor en Autodesk Inventor para optimizar el flujo de aire. Se diseñó un sistema de tuberías y puntos de inyección de lubricante integrado en el cubrecables articulado de la CNC. Finalmente, se creó una placa de control en Autodesk Eagle, basada en un microcontrolador Atmega328P (implementado en Arduino Nano), para coordinar el extractor y el lubricador.

2.2.1 Especificaciones de los componentes

El diseño CAD de los soportes del extractor se basó en un colector de polvo al vacío existente en la empresa que se muestra en la figura 2. Sus características aseguran una succión eficiente para partículas de hasta 0.5 µm, con un volumen de aire de 3150 m^3.

Fig. 2. Colector de residuos

La potencia requerida se estimó mediante la Ec.1 de potencia para ventiladores:

$$P = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta} \quad (1)$$

donde:

$$Q = caudal\ volumétrico$$
$$\Delta p = pérdida\ de\ presión\ en\ el\ sistema$$
$$\eta = eficieencia\ del\ ventilador$$

Despejando Q y sustituyendo valores en la Ec.2:

$$Q = 3150 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 0.875 \frac{m^3}{s} \quad (2)$$

$$\Delta p \approx 1500 Pa$$
$$\eta = 0.75$$

Se tomó ese valor de Δp en base a la curva característica del colector y a datos de la literatura sobre pérdidas en sistemas de extracción en procesos similares (Wang et al., 2020) y η=0.75

es un valor estándar para ventiladores centrífugos (ASHRAE Handbook, 2021)

Entonces:

$$P = \frac{0.875 \cdot 1500}{0.75} = 1.75kW \quad (3)$$

Para garantizar un margen de seguridad y soportar picos de carga, se seleccionó un motor de $P = 3kW$.

2.2.2 Modelado CAD de la base del extractor

El modelado asistido por computadora (CAD) en Autodesk Inventor permitió garantizar un ajuste dimensional preciso de los soportes y, al mismo tiempo, optimizar el flujo de aire en el colector.

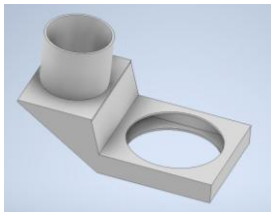


Fig. 3. Modelo de la base del extractor

Para el diseño del montaje, se midió el diámetro del motor (D = 125 mm) y, en función de este valor, se generó un soporte con un orificio central de igual diámetro que posibilita el paso adecuado de aire tal como se aprecia en la figura 3.

De forma complementaria, se desarrolló una abrazadera de sujeción destinada a proporcionar estabilidad mecánica al motor y a facilitar su integración con el colector. El diseño considera ranuras que permiten el ajuste del par de apriete, incrementando la seguridad estructural del sistema y favoreciendo la precisión en el ensamble, tal como se ilustra en la Figura 4.

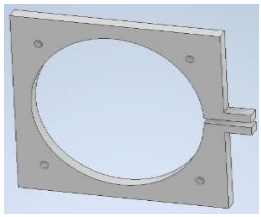


Fig. 4. Modelo de la abrazadera

2.2.3 Diseño de tuberías y puntos de inyección de lubricante

En este apartado, se buscó un lugar adecuado para instalar el sistema de tuberías y puntos de inyección de lubricante sobre la CNC, asegurando que no se dañara la superficie y que el sistema propuesto pudiera operar sin exceder su capacidad. Tras analizar la estructura de la máquina, se determinó que el cubre cable articulado, que se muestra en la figura 5, era el sitio más adecuado, ya que permite proteger la manguera contra daños y sincronizar su movimiento con los ejes de la máquina.

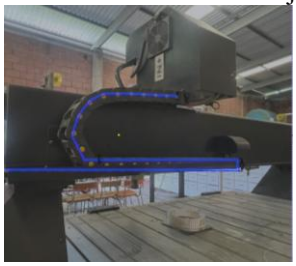


Fig. 5. Colocación de manguera para el lubricante

El caudal de lubricación para procesos CNC suele estar en el rango de 10 a 20 ml/min (≈ 1.67×10^{-7} a 3.33×10^{-7} m^3/s), correspondiente a lubricación por goteo continuo, habitual en operaciones de fresado con alta remoción de material. En contraste, los sistemas MQL utilizan caudales significativamente menores, generalmente < 25 ml/h, debido a su aplicación mediante atomización neumática.

Tomando un valor medio, $2.5x10^{-7}$, con la Ec.5 se calcula la velocidad promedio del lubricante en la manguera:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{2.5x10^{-7}}{1.96x10^{-5}} = 0.013\,{}^{m}/_{s} \quad (5)$$

Este valor de velocidad es bajo, pero resulta adecuado considerando la alta viscosidad de los lubricantes CNC (0.03 a 0.1 Pa·s). En la práctica, esto implica un flujo laminar, estable y continuo, sin pérdidas de lubricante por salpicadura y con una deposición más controlada en la fresa. De esta manera, aunque el diámetro de 5 mm es mayor al estrictamente necesario, su elección fue funcional y asegura robustez mecánica, facilidad de instalación y un suministro confiable de lubricante durante la operación.

2.2.4 Diseño de la placa de control

Se escogió diseñar la placa PCB en Autodesk Eagle por su capacidad para pasar desde el diagrama esquemático hasta el enrutamiento de pistas y la verificación previa a la fabricación. El diseño está centrado en un microcontrolador Atmega328P (Arduino Nano), actuadores (relés), indicadores LED y la alimentación de una bomba de 12 V (0.75 A). A continuación, se muestran los cálculos eléctricos básicos realizados para asegurar la funcionalidad y la fiabilidad de la PCB.

Para el cálculo de las resistencias de los LED´s se utiliza la Ec.6, donde $V_{cc} = 5V$ y el objetivo es limitar la corriente a 15mA, se considera un voltaje típico de consumo del LED de 2V.

$$R = \frac{V_{cc} - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5-2}{0.015} = 200\Omega \quad (6)$$

El valor comercial recomendado es de 220Ω (1/8W o 1/4W)

Para el cálculo de la resistencia de base para el transistor 2N2222 para conmutar en relé de bobina de 100mA, se usará una β forzada de 10 por lo que la corriente de base sería de 10mA. Sustituyendo en la Ec.7, se obtiene:

$$R_B = \frac{V_{pin} - V_{BE}}{I_B} = \frac{5-0.7}{0.01} = 430\Omega \quad (7)$$

El valor comercial recomendado es de 470Ω (1/8W o 1/4W)

La lista completa de componentes electrónicos se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 3. Lista de componentes electrónicos

Cantidad	Nombre	Especificación
12	Leds	5 mm
6	Transistores	2n2222
19	Clemas de dos pines	2
6	Clemas de tres pines	3

6	Resistencias	430 Ohms
24	Resistencias	220 Ohms
1	Arduino Nano	30 pines-16 MHz-19 mA
6	Optoacoplador	4N35
6	Relevadores	5 VCC
1	Placa fenólica de cobre	15 x 15 cm
6	Zócalos	6 pines

En la Fig.6 se muestra el diagrama esquemático de la placa controladora programable, diseñada para ser utilizada con el IDE de Arduino. El componente principal es un microcontrolador Atmega328P. Está en el centro del esquema y tiene varias conexiones hacia diferentes componentes. Los indicadores están conectados a varios pines del microcontrolador a través de las conexiones lo que permite su uso para señalización y pruebas.

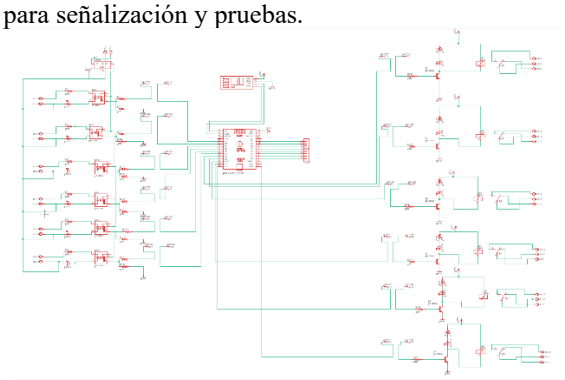


Fig. 6. Diagrama esquemático de la placa controladora.

Posteriormente, en la Fig.7 se muestra el diseño de la tarjeta de circuito impreso (PCB) con los componentes electrónicos.

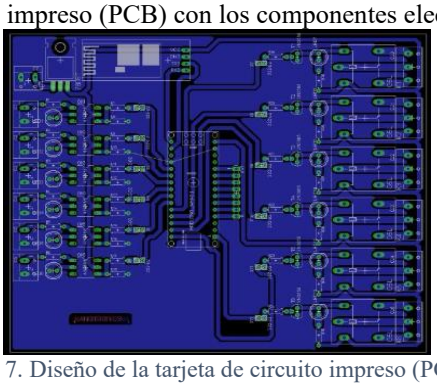


Fig. 7. Diseño de la tarjeta de circuito impreso (PCB)

La tarjeta tiene activadas las capas de pistas y la tierra compartida(azul) generada con la herramienta polígono, los pads (verde), respectivamente. Al centro del PCB se encuentra un Arduino Nano, rodeado de varias pistas que se conectan a diferentes componentes alrededor de la placa, a los costados del microcontrolador, se observan doce componentes LEDs, dispuestos en dos columnas, una en cada extremo. Cada LED tiene una resistencia conectada en serie.

2.2.5 Selección de materiales para la fabricación de piezas

Se evauaron materiales como PETG (filamento para impresión 3D) y Nylamid para fabricar abrazaderas y piezas de soporte, considerando sus propiedades mecánicas (tensión de rotura, módulo de elasticidad, resistencia al impacto y a la flexión) y térmicas (temperatura de distorsión). La comparativa se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales

Propiedad	PETG	Nylamid	Unidad
Tensión de rotura	499.661 (49.00 MPa)	760 (74.53 MPa)	kg/cm² (MPa)
Módulo de elasticidad	20,669.65 (2.03 GPa)	28,124 (2.76 GPa)	kg/cm² (GPa)
Resistencia de impacto	8	8	kJ/m²
Resistencia a la flexión	693,407 (68.00 GPa)	500,000 (49.03 GPa)	kg/cm² (GPa)
Temperatura de distorsión	65	93.3	°C

El Nylamid se seleccionó para la abrazadera debido a su superior resistencia al desgaste, tenacidad y temperatura de distorsión, ideal para soportar esfuerzos mecánicos en la CNC, mientas que el PETG se usó para la impresión 3D de la segunda pieza.

2.3 Construcción e instalación

2.3.1Construcción de la PCB

La tarjeta de circuito impreso (PCB), con dimensiones de 15 × 15 cm, se fabricó utilizando el método de transferencia térmica y grabado químico con ácido férrico.

El proceso consistió en:

1. Exportación del diseño en formato PDF desde Autodesk Eagle, en modo espejo.
2. Impresión en del diseño de las pistas
3. Preparación de la placa fenólica: limpieza de la superficie y transferencia del diseño.
4. Grabado químico con ácido férrico para eliminar el cobre sobrante.
5. Perforado y soldado de los componentes electrónicos en la placa, como se observa en la figura 8.

Fig. 8. Componentes soldados a la placa

Este método permitió obtener una PCB funcional, compacta y optimizada, asegurando bajo costo de fabricación y compatibilidad con el sistema de control basado en Arduino Nano.

2.3.2 Elaboración de las piezas y montaje

La estructura del sistema se conformó a partir de dos materiales principales: Nylamid, mecanizado para la fabricación de la abrazadera (Figura 9).

Fig. 9. Mecanizado de la abrazadera

El PETG se usó para la impresión en 3D del extractor. Ambas piezas se ensamblaron mediante tornillería, logrando tolerancias de ajuste menores a 0.5 mm, lo que garantizó estabilidad y alineación del sistema. Ambas piezas terminadas se muestran en la figura 10.

Fig. 10. Extractor armado

2.3.3 Instalación del sistema de lubricación

Se instalaron mangueras de 5 mm de diámetro en el cubrecables articulado de la CNC, lo que permitió protegerlas y mantener su movimiento sincronizado con los ejes de la máquina. Para garantizar estabilidad y evitar fugas en el suministro del lubricante, se emplearon bridas de sujeción y selladores en las uniones.

Fig. 11. Proceso de instalación de los conductos del sistema de lubricación.

2.3.3 Instalación del sistema de lubricación

La instalación concluyó con el montaje simultáneo del sistema de extracción de residuos y el sistema de lubricación sobre la CNC. Ambos se acoplaron de manera compacta, asegurando que no interfirieran con el recorrido de los ejes y manteniendo un flujo de operación continuo y automatizado.

Figura 12. Sistema de extracción y lubricación montados en la CNC

De forma complementaria, la placa de control fue alojada en un gabinete protector, diseñado para resguardar los componentes electrónicos y facilitar la conexión con los puertos de la CNC. Esta disposición permite un acceso sencillo para mantenimiento, al mismo tiempo que asegura la confiabilidad del sistema en condiciones industriales.

Fig. 13. Colocación del gabinete para la placa de control

3. RESULTADOS

El sistema de extracción de residuos mostró mejoras significativas en la limpieza del área de trabajo, con una reducción de residuos del 85% al 91% en plástico, metal ligero y madera.

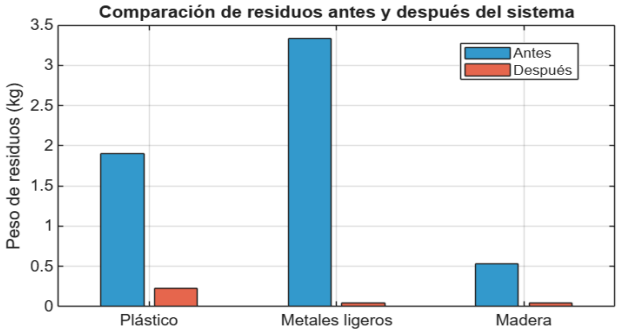


Fig. 14. Gráfica comparativa de la mejora en reducción de residuos

El impacto de estos resultados se puede observar claramente en la gráfica de la Figura 14, donde se comparan los niveles de residuos antes y después de la implementación. Esta optimización no solo minimiza la necesidad de limpieza manual, sino que también permite un uso más eficiente del tiempo y los recursos.

En la Tabla 5, que destaca el porcentaje de mejora obtenido, mismos que se obtuvieron pesando la cantidad de residuos

generados en ciclos equivalentes de corte, comparando la masa acumulada antes y después de la implementación del sistema. La reducción se calculó con:

$$\%Reducción\ de\ residuos = \frac{R_{sin} - R_{con}}{R_{sin}} x100$$

Donde: R_{sin} es la cantidad de residuo sin extracción integrada y R_{con} la cantidad con el sistema activado.

Estos avances subrayan la importancia del sistema integrado en la mejora de la productividad y el mantenimiento del entorno de trabajo.

Tabla 5. Porcentaje de mejora en la disminución de residuos

Material	Antes del Sistema	Después del sistema	Porcentaje de mejora
Residuo de plástico	1.9 kg	0.226 kg	85.99%
Residuo de metales ligeros	3.33 kg	0.5 kg	84.98%
Residuos de madera	0.5333 kg	0.048 kg	91.00%

El sistema logró una reducción de entre 85% y 91% en los residuos presentes en el área de trabajo. Esto se traduce en:

- Mayor limpieza y seguridad en el entorno de operación.
- Menor necesidad de limpiezas manuales frecuentes.
- Mayor durabilidad de la CNC y sus componentes al evitar acumulaciones de polvo.
- Incremento en la productividad y eficiencia del proceso de mecanizado.

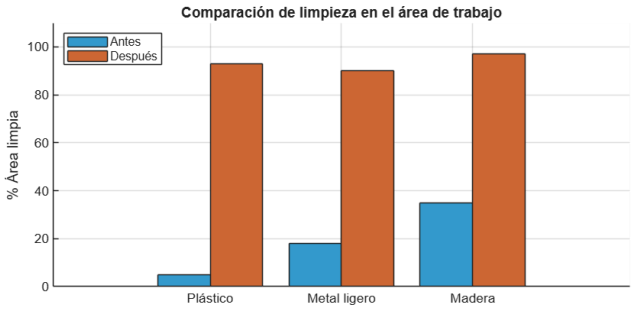


Fig. 15. Gráfica comparativa de la limpieza del área de trabajo

Las pruebas en condiciones reales confirmaron la correcta integración del sistema con la CNC, validando su eficacia tanto en el manejo de residuos como en la lubricación de la herramienta.

Además de la reducción de residuos ya documentada, se obtuvieron mejoras adicionales en la operación de la CNC tras la implementación del sistema de extracción y lubricación, mismas que se pueden resumir en la tabla 6.

Indicador	Antes	Después	Mejora
Área limpia en mecanizado de plástico	5%	93%	+88%
Área limpia en mecanizado de metal ligero	18%	90%	+72%
Área limpia en mecanizado de madera	35%	97%	+62%
Tiempo promedio de limpieza	10–15 min	<3 min	–80%
Consumo de lubricante	100%	~70%	–30%
Vida útil de fresas	100%	~125%	+25%
Exposición a polvo fino	Alta	Muy baja	Riesgo reducido

4. CONCLUSIONES

La implementación de un sistema combinado de extracción de residuos y lubricación automática en un router CNC demostró ser una solución integral para mejorar la calidad, seguridad y eficiencia del mecanizado.

El desarrollo siguió una metodología estructurada en seis etapas, apoyada en Autodesk Inventor para modelado CAD y Autodesk Eagle para diseño de PCB, lo que permitió anticipar problemas, optimizar la instalación y garantizar confiabilidad. Los prototipos de extractor y sistema de tuberías integrados al cubrecables lograron un flujo de aire de 3,150 m³/h y de lubricante de 15 ml/min, minimizando interferencias con los movimientos de la CNC. Los materiales empleados, Nylamid y PETG fueron validados mediante cálculos de deformación y estrés, confirmando su idoneidad mecánica y térmica.

Los resultados experimentales mostraron reducciones superiores al 85% en residuos y una extensión de ~25% en la vida útil de las fresas, evaluada mediante desgaste de flanco (VB de 0.20 mm a 0.15 mm tras 100 m de corte, según ISO 8688-2). La lubricación automatizada, redujo fricción y temperatura en la zona de corte, retrasando el desgaste crítico y mejorando la precisión del mecanizado, además de disminuir la exposición a polvo y partículas.

En conclusión, el sistema representa un avance hacia entornos de manufactura más limpios, seguros y sostenibles, alineados con prácticas industriales modernas potenciando la productividad y reduciendo costos operativos.

REFERENCIAS

García, P. and López, M. (2021). Automatización de la lubricación en procesos de mecanizado CNC. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 25(2), 45–53.

López, R. and Hernández, J. (2018). Diseño asistido por computadora: aplicaciones en manufactura. *Ingeniería y Tecnología*, 12(3), 55–64.

Martínez, L. and Torres, F. (2017). Sistemas de manufactura sustentable: control de residuos en procesos industriales. *Revista Mexicana de Ingeniería Industrial*, 9(1), 22–30.

Smith, J., Brown, A., and Lee, K. (2019). Health risks of airborne particles in CNC machining. *Journal of Occupational Safety*, 33(4), 211–219.

Wang, H., Liu, Y., and Chen, X. (2020). Multilayer filtration systems for fine particle extraction in industrial machining. *International Journal of Manufacturing Systems*, 45(6), 377–385.

Zhao, Q. and Kim, S. (2018). Automated lubrication and tool wear reduction in CNC milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 150–158.

Redesign and Construction of a Multifunctional Reactor for Biofuel Production

Vazquez Maceda Sandro*, Acevedo Quiroz Abisai, Adam Medina Manuel**, Cervantes Bobadilla Marisol**, García Morales Jarniel****

**Posgrado en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET (Tel: 777 216 7934; (m24ce079@cenidet.tecnm.mx).*

***CENIDET. Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. (abisai.aqp@cenidet.tecnm.mx, manuel.am@cenidet.tecnm.mx, marisol11e@cenidet.tecnm.mx, jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: The redesign and construction of a multifunctional laboratory-scale reactor is proposed for the production of biofuels, specifically biodiesel. The reactor is designed as a tubular tank constructed from 304L stainless steel, with an effective working volume of 10 liters. The main objective of this redesign is process intensification, integrating multiple unit operations into a compact system aimed at improving energy efficiency, reducing physical space requirements, and increasing operational capacity. The proposed prototype is based on previous studies, reactor design equations, and material balances, considering an operational capacity of 10 liters. It will be equipped with a mechanical agitation system designed to ensure reactant homogeneity and enhance mass transfer throughout the process. Additionally, an internal helical coil will be incorporated to serve as a heat exchanger, enabling efficient thermal control of the system. The reactor will be instrumented with temperature sensors and digital flowmeters, allowing for precise monitoring and control of critical process variables. These tools enable fine-tuned process control, which is essential for ensuring efficient conversion of vegetable oils into biodiesel. As one of its main advantages, this multifunctional reactor will have the capability to couple various physico-chemical phenomena—such as chemical reactions, mixing, heat and mass transfer, and even evaporation, distillation, and fermentation—within a single unit. This integration will help reduce operation times and enhance the overall efficiency of the system. The prototype will be implemented in the Electronics Laboratory and will be used for academic and research purposes by graduate students in electronic engineering. It will serve as a platform to evaluate its performance under controlled conditions and as a foundation for the development of future industrial process control systems.

Keywords: Multifunctional reactors, Process intensification, Biofuels, Design - Integration, Energy savings.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la demanda de biocombustibles ha experimentado un notable crecimiento, debido a que representan fuentes de energía limpia, amigables con el medio ambiente y que cumplen con los criterios de sostenibilidad energética (Razm et al., 2023). Entre estos biocombustibles, el biodiesel destaca como uno de los más importantes, pudiendo obtenerse mediante diversas metodologías, siendo la transesterificación la técnica más utilizada en la actualidad (Rezania et al., 2019). La transesterificación puede realizarse en distintos tipos de reactores químicos, ya sean discontinuos, semicontinuos o continuos.

La literatura ha demostrado que el tipo de reactor utilizado impacta de manera significativa tanto en el rendimiento del catalizador como en la eficiencia de la conversión a biodiesel (Bizualem and Nurie, 2024). Por esta razón, el diseño y la construcción de reactores multifuncionales se posicionan como una estrategia clave para la intensificación de los procesos de producción de biodiesel, al integrar múltiples operaciones unitarias en un único equipo (Baharundi et al., 2021).

Un reactor multifuncional es una unidad que integra de manera simultánea diversos fenómenos físicos y/o químicos, tales como reacciones químicas, separación, transferencia de masa, calor, y mezclado. Además, puede operar en diferentes configuraciones, funcionando como dos tipos distintos de reactores dentro de un mismo sistema (Macedo et al., 2021).

El principal objetivo de estos reactores es la intensificación de procesos, que busca reducir el tamaño del equipo y minimizar el consumo energético, optimizando así la eficiencia global del proceso. Para su diseño, es común integrar las ecuaciones correspondientes a reactores ideales, tanto discontinuos (Ec. 1) como de tanque agitado continuo (Ec. 2) (Levenspiel, 1998).

$$t = \int_{C_{Ai}}^{C_A} \frac{dC_A}{-r_A} \qquad (1)$$

$$V = \frac{f_{Ai}(C_{Ai} - C_A)}{-r_A} \qquad (2)$$

Donde: t = tiempo de reacción (s), V = volumen del reactor (m^3), C_{Ai} = concentración inicial del reactivo A (mol/L), C_A = concentración final del reactivo A (mol/L), f_{Ai} = flujo molar del reactivo A (mol/L) y $-r_A$ = velocidad de reacción del reactivo A (mol/L s).

La geometría del reactor desempeña un papel fundamental en su diseño, ya que debe garantizar una adecuada compatibilidad entre las diversas operaciones acopladas. Asimismo, es crucial considerar los materiales de construcción y los diferentes insumos que se utilizarán durante el proceso. Por otro lado, la automatización y el control de procesos son elementos clave para la implementación exitosa de estos sistemas (Zapater et al., 2024). Dado que múltiples fenómenos físico-químicos ocurren de manera simultánea, resulta imprescindible contar con sensores precisos y sistemas de control de temperatura y flujo que aseguren una operación estable y eficiente del reactor (Brásio et al., 2013). En este contexto, el diseño y la construcción de reactores multifuncionales para la producción de biodiesel representan una solución avanzada e innovadora para enfrentar los retos actuales en la industria de los biocombustibles. Esta estrategia contribuye a mejorar la eficiencia, sostenibilidad y reducción de costos, haciendo más viable la adopción del biodiesel como fuente alternativa de energía.

2. METODOLOGÍA

La construcción del reactor multifuncional se desarrollará en dos etapas. En la primera etapa, se realizará el rediseño del reactor con el objetivo de operar bajo dos configuraciones distintas: tipo tanque y tipo tubo helicoidal. En la segunda etapa, se definieron los instrumentos y equipos necesarios para su construcción e instrumentación. El prototipo resultante del rediseño permitirá que el reactor funcione en ambas configuraciones, y bajo diferentes regímenes de operación: continuo, discontinuo y semicontinuo. Tanto el rediseño como la selección de componentes se fundamentaron en ecuaciones de diseño de reactores y cálculos operativos específicos para cada etapa del proceso. Considerando un volumen de trabajo efectivo de 10 litros, se aplicó la ecuación de diseño correspondiente a un reactor con geometría cilíndrico-cónica, compuesto por un cuerpo cilíndrico y un fondo cónico (Acosta et al., 2008), como se muestra en la Ec. 3.:

$$V = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 H_C + \frac{1}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 H_{CO} \qquad (3)$$

Donde: V = volumen del reactor (m^3), D= diámetro del cilindro (m), H_C= Altura del cilindro y H_{CO}= Altura del cono (m).

El tanque del reactor experimental está fabricado en acero inoxidable 304L, material seleccionado por su alta resistencia a la corrosión, La Tabla 1 muestra las dimensiones del reactor. En la parte superior cuenta con una tapa equipada con tres racores roscados tipo NPT: dos de ½" y uno de 1", destinados a la instalación de sensores e instrumentos. Para garantizar un cierre hermético durante la operación, la tapa se asegura mediante cinco abrazaderas de sujeción distribuidas uniformemente. En la parte inferior del tanque se encuentra instalado un medidor de temperatura analógico y una válvula de flujo de alta presión, utilizada para el vaciado o drenado del contenido. La configuración general del reactor puede observarse en la Figura 1.

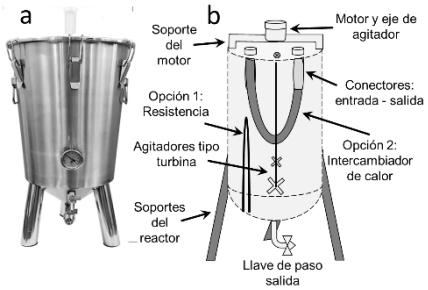


Fig. 1. a) Reactor experimental, b) Rediseño del reactor.

La primera etapa del rediseño se realizó en la tapa del reactor, donde se instalarán cuatro racores roscados: dos con un diámetro externo de ½" y dos de ¼", destinados a las líneas de alimentación y salida de flujo másico. Además, se incorporará una conexión para el eje del agitador y una base de soporte para el motor, que permitirá la correcta transmisión del movimiento al sistema de agitación. Estos elementos se ilustran en la Figura 2.

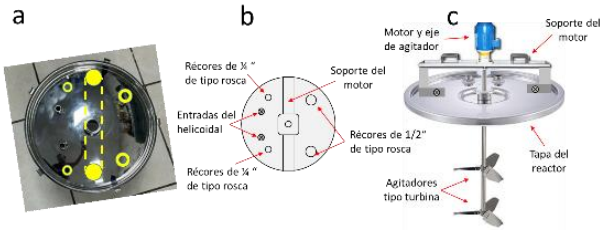


Fig. 2. a) Tapa de reactor, b) Rediseño de la tapa de reactor, c) Sistema completo de mezclado, motor con agitadores.

Debido al diseño del tanque del reactor, se optó por la instalación de dos racores con rosca NPT de ½", destinados a la colocación de sensores de temperatura, como se muestra en la Figura 3. Además, en la parte inferior del reactor se incorporará un conector roscado de 1" de diámetro, que permitirá la instalación de una resistencia eléctrica de inmersión de 250 o 500 W, utilizada para el control térmico del proceso. Para el vaciado del contenido, el reactor cuenta con dos salidas de purga: una destinada a la extracción de glicerina (en caso de que el reactor funcione también como decantador), y otra para la recolección del biodiésel producido.

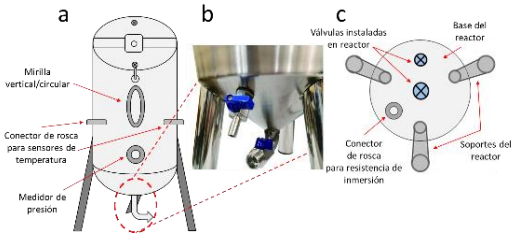


Fig. 3. a) Modificaciones en cuerpo del reactor, b) Válvulas de salida, c) Modificaciones en la base del reactor.

Adicionalmente al rediseño estructural del reactor, el sistema contará con dos bombas de desplazamiento positivo para la alimentación controlada de reactivos, así como un motor de ¼ HP acoplado a un eje de agitación, destinado a mejorar la mezcla en el interior del tanque. Para el monitoreo y control de las variables críticas del proceso, el reactor será instrumentado con medidores de flujo másico, sensores de temperatura tipo PT-100 y un transductor de presión. Tanto los sensores de temperatura como los de flujo estarán conectados a un sistema de adquisición de datos, permitiendo el registro y almacenamiento de mediciones a intervalos de 10 segundos, mediante el uso de una tarjeta de desarrollo NI myRIO. La Figura 4 muestra algunos de los sensores que forman parte del sistema de instrumentación propuesto.

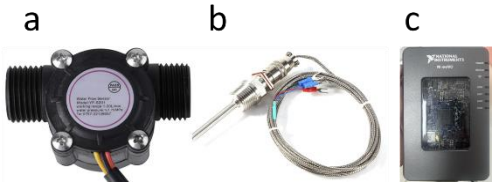


Fig. 4. a) Sensor de flujo, b) Sensor de temperatura, c) Dispositivo de adquisición de datos.

Con el objetivo de diseñar equipos más compactos y con un desempeño térmico más eficiente, particularmente en la reducción de pérdidas de calor, es fundamental considerar la geometría del sistema. En este sentido, el rediseño del tanque del reactor ha permitido desarrollar un reactor multifuncional capaz de operar tanto en modo discontinuo como continuo, lo que representa una solución versátil con alta flexibilidad operativa. Esta capacidad de operar bajo distintos regímenes reduce significativamente la necesidad de utilizar múltiples equipos, y permite maximizar el aprovechamiento de recursos, tanto materiales como energéticos, optimizando así la eficiencia general del proceso.

Una de las características destacadas de este reactor multifuncional es su capacidad para operar en dos modos distintos de calentamiento. El Modo Tipo 1 corresponde al calentamiento mediante resistencias eléctricas de inmersión, instaladas directamente en el interior del reactor. Por otro lado, el Modo Tipo 2 emplea un intercambiador de calor interno tipo serpentín, a través del cual circula un fluido térmico para transferir calor al sistema, como se muestra en la Figura 5. Esta doble modalidad de operación térmica brinda mayor versatilidad al sistema, permitiendo su adaptación a diferentes condiciones de proceso, necesidades energéticas y esquemas de control térmico.

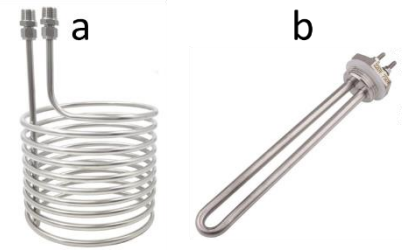


Fig. 5. a) Intercambiador de calor de tubo helicoidal, b) Resistencia de inmersión.

Otra de las ventajas clave de este reactor multifuncional es su capacidad de adaptación a diferentes requerimientos operativos, ya que puede funcionar en régimen continuo, tanto en configuración de tanque agitado como en modo de reactor tubular helicoidal. En este último caso, el serpentín cumple una doble función: actúa como intercambiador de calor y como canal para el flujo del reactivo, mientras que el calentamiento se realiza mediante resistencias térmicas de inmersión. Por otro lado, cuando el proceso se ejecuta en régimen discontinuo (batch), la operatividad se centra en el tanque del reactor con sistema de agitación, y el calentamiento puede aplicarse a través de cualquiera de las dos modalidades disponibles: el Modo Tipo 1, con resistencias de inmersión, o el Modo Tipo 2, mediante el intercambiador de calor tipo serpentín.

Esta flexibilidad operativa convierte al sistema en una herramienta operativamente versátil. Además de integrar en un solo equipo operaciones como agitación, mezcla, transferencia de calor y masa, así como el monitoreo y control de variables críticas, este reactor no solo mejorará significativamente la eficiencia del proceso, sino que también se convierte en una herramienta didáctica y de investigación de gran valor. Su diseño permite la exploración práctica y el análisis experimental de nuevas configuraciones de reactores, lo que lo hace especialmente útil para el estudio de tecnologías emergentes en la industria de los biocombustibles.

Tabla 1. Dimensiones del reactor experimental.

	Tanque	Serpentín
Altura (m)	0.40	0.18
Diámetro interno (m)	0.34	0.018
Diámetro serpentín (m)	–	0.22
Longitud tubo (m)	–	8
Número de vueltas	–	10
Área superficial (m^2)	0.65	0.53
Volumen de trabajo (m^3)	0.036	0.002

3. CONCLUSIONES

En este trabajo se recopiló y analizó diversos estudios sobre el diseño y la construcción de reactores multifuncionales, así como las metodologías empleadas para la producción de biodiesel. A partir de esta revisión, se identificaron los parámetros clave para mejorar el proceso, tales como el volumen de trabajo, el tipo de reactor y el modo de operación más adecuado para maximizar la conversión bajo condiciones específicas. Con base en el tanque previamente disponible en el laboratorio, se desarrolló un rediseño del reactor multifuncional sustentado en principios teóricos, cálculos de ingeniería y datos experimentales, que permite una flexibilidad operativa. La configuración propuesta, que incluye un sistema de control integrado, representa una alternativa viable para aplicaciones en laboratorio y pruebas a escala piloto, y sienta las bases para futuras etapas de optimización y escalamiento del proceso.

REFERENCIAS

Acosta, F., Castro, P., Cortijo, E. (2008). Manual de construcción y uso de Reactor para producción de biodiesel a pequeña escala. Primera edición. Soluciones prácticas-ITDG. 06519.

Baharudin, Lin., Indera, A.A., Watson, M.J., Yip, A.C.K. (2021). Process intensification in multifunctional reactors: A review of multi-functionality by catalytic structures, internals, operating modes, and unit integrations. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 168, 108561.

Bizualem, Y.D., Nurie, A.G. (2024). A review on recent biodiesel intensification process through cavitation and microwave reactors: Yield, energy, and economic analysis. Heliyon.10, e24643.

Brásio, A.S.R.; Romanenko, A.; Leal, J.; Santos, L.O.; Fernandes, N.C.P. (2013). Nonlinear model predictive control of biodiesel production via transesterification of used vegetable oils. J. Process. Control. 23, 1471–1479.

Levenspiel, O. (1998). Chemical Reaction Engineering. 3rd Edition. Wiley.

Macedo, M.S., Soria, M.A., Madeira, L.M. (2021). Process intensification for hydrogen production through glycerol steam reforming. Renewable and Sustainable Energy Reviews 146, 111151.

Razm, S.; Brahimi, N.; Hammami, R.; Dolgui, A. (2023). A production planning model for biorefineries with biomass perishability and biofuel transformation. Int. J. Prod. Econ. 258, 108773

Rezania, S.; Oryani, B.; Park, J.; Hashemi, B.; Yadav, K.K.; Kwon, E.E.; Hur, J.; Cho, J. (2019). Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications. Energy Convers. Manag. 201, 112155

Zapater, D., Kulkarni, S.R., Weryc, F., Cui, M., Herguido, J., Menendez, M., Heynderickx, G.J., Van Geem, K.M., Gascon, J., Castaño, P. (2024). Multifunctionalfluidizedbedreactorsforprocessintensification. Progress in Energy and Combustion Science. 105, 101176.

Solar photovoltaic pumping as an alternative to grid extension: A case study in the Mixteca Poblana

Galicia Vargas, Erick*, González Ortega, Alfredo Aguayo Alquicira, Jesús***.**

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.

(e-mail: m24ce068, alfredo.go@cenidet.tecnm.mx, jesus.aa@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Rural communities in Mexico face limited access to electricity and water, which restricts agricultural production and socio-economic development. This study presents a techno-economic analysis of two water supply solutions for isolated areas in the Mixteca Poblana: grid extension and a photovoltaic pumping system. Water demand was estimated using the FAO-56 Manual and CropWat software, while solar availability was assessed using NASA data. The PV system includes a 1 hp submersible centrifugal pump, three 150 W panels, and a 12 V, 200 Ah battery bank. Performance and storage requirements were evaluated under unfavorable conditions. The analysis showed that a 2 km grid extension with a cost of $600,000 MXN is less viable than a PV system costing $60,000–80,000 MXN, capable of irrigating 0.5 ha of forage maize with a system payback period of 3 to 4 years. This demonstrates that photovoltaic pumping is a sustainable solution both technically and economically, ensuring water access in remote rural communities while improving food security and resilience through renewable energy.

Keywords: *Photovoltaic pumping, Rural electrification, Techno-economic analysis, Off-grid systems*

1. Introducción

Actualmente, muchas regiones rurales alrededor del mundo dependen de la agricultura como su principal actividad económica, y algunas de estas carecen de acceso a la electricidad, lo que dificulta desarrollo. En 2019, de los 7.670 millones de habitantes del mundo, aproximadamente 760.89 millones no contaban con acceso a este recurso básico ('Access to Energy - Our World in Data', s.f.). En México, a pesar de los avances en cobertura eléctrica, aún existen comunidades especialmente rurales sin acceso a la electricidad; según el INEGI (2020), aproximadamente el 1% de la población mexicana, es decir, cerca de 1.2 millones de personas, viven sin suministro eléctrico (INEGI, 1998). Este sector de la población se ve limitado en su desarrollo económico y social, por lo que, en este contexto, el acceso al agua para el riego o consumo se vuelve un problema estructural, especialmente cuando las fuentes de agua de la comunidad, ya sean cuerpos de agua o pozos, requieren bombeo mediante energía eléctrica, lo que también limita el acceso al agua.

1.1 Extensión de red

Una de las soluciones consiste en solicitar una extensión de la red eléctrica a la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Sin embargo, el trámite contiene requisitos específicos: **en zonas urbanas**, se necesita un poste de luz a menos de 35 metros y en **zonas rurales**, a menos de 50 metros (Contigo, 2022). Si no cumplen estas condiciones, el usuario en cuestión debe asumir los costos.

Esta opción resulta inviable para pequeñas comunidades y pequeños ganaderos debido a los altos precios que CFE cotiza por kilómetro, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1 Costos de extensión de red por kilómetro.

Parámetro	**Configuración A**	**Configuración B**
Descripción técnica		
Tipo de sistema	Monofásico (1 fase + neutro)	Monofásico (1 fase + neutro)
Conductores por fase	1 conductor	1 conductor
Calibre del cable	1/0 AAC (≈53.5 mm²)	3/0 AAC (≈85.0 mm²)
Voltaje nominal	13 kV	13 kV
Costos (MXN/km)		
Materiales	$193,620.26	$208,409.34
Instalación	$86,680.85	$86,680.85
Diseño	$15,738.52	$15,738.52
Supervisión	$4,784.19	$4,784.19
Costo Total (MXN/km)	$300,823.82	$315,612.90

Si bien en la tabla se muestran costos mínimos para extender red eléctrica en dos configuraciones básicas para una casa, estos precios, compartidos por CFE, no incluyen gastos adicionales como permisos, trámites legales o mano de obra. Además, la infraestructura construida queda como propiedad de la CFE, lo cual es un factor importante para considerar.

1.2 Sistemas de bombeo solar

Una de las soluciones para estas comunidades es el uso de sistemas de energía renovable (Masera y Torres-Wong, 2020). Para muchos países, la energía solar es la opción más eficiente en zonas de alta irradiación solar (Ibrahim, Ghetany y Shabak, 2020). Estas se presentan en dos tipos de bombeo: el directo y el que utiliza baterías (Orts-Grau et al., 2021), como se muestra en la Figura 1.

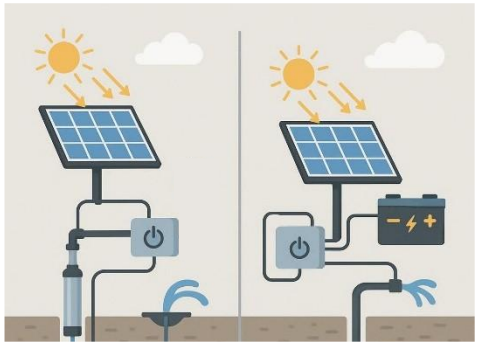


Figura 1 Sistema de bombeo directo y con baterías

Sin importar el tipo de bombeo escogido, los sistemas de energía solar se presentan como una de las opciones más viables en comparación con la extensión de la red eléctrica, según la literatura consultada.

Tabla 2 Creación propia precios de los sistemas de bombeo de la literatura.

Potencia de la bomba	Precio original	Moneda	Conversión a MXN (aprox.)
Motor de inducción de 2.2 kW	10,000	USD	$180,000
Bomba sumergible 1.5 kW	13,222.60	MXN	$13,222.60
Bomba 1.5 kW	199,000	NGN	$8,755
Motor de 10 HP (~7.46 kW)	3,395,740	PKR	$46,800
Modelo de negocio con bombas	200,000	USD	$3,600,000
Motor de 10 HP (~7.46 kW)	800	USD	$14,400
Bomba centrífuga AC 1.4 kV	3,974,600	XOF	$119,238

En este contexto, se realizó una comparación técnico-económica entre la extensión de red eléctrica y la implementación de un sistema fotovoltaico autónomo para el abastecimiento de agua en un pozo semiprofundo ubicado en la Mixteca Poblana.

De esta forma, se obtienen beneficios como una sustentabilidad, un mejor acceso al agua y un bombeo asegurado hasta el riego de una parcela, con un retorno de inversión menor a 5 años, en comparación con una extensión de red.

2. METODOLOGÍA

La metodología adoptada, para el desarrollo del sistema de bombeo propuesto es la siguiente:

2.1. Elección del sitio.

Para la elección del sitio se buscó un lugar que contara con un cuerpo de agua cercano, ubicado en una zona aislada. El área seleccionada fue la parte sur de Puebla, conocida como la Mixteca Poblana, que se localiza en la latitud 18.28° y la longitud -98.03°.

- Estudio de viabilidad de conexión a la red: Para este caso de estudio, se contempló el poste más cercano a 2 kilómetros. Siguiendo los precios establecidos en la Tabla 1, se estima un costo aproximado de $600,000 MXN para la extensión de la red eléctrica.

- Potencial de energía fotovoltaica: Para el dimensionamiento solar, la literatura consultada indica que se debe utilizar el dato de la irradiación promedio del mes más bajo (Haase et al., 2023), que para nuestro caso de estudio es diciembre. Este dato se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3 Radiación solar promedio año 2022 (*POWER | DAV*, no date)

Promedio al mes	Radiación Solar (kW-hr/m²/día)
Enero	4.92
Febrero	5.71
Marzo	6.4
Abril	6.59
Mayo	6.31
Junio	5.73
Julio	5.66
Agosto	5.66
Septiembre	4.95
Octubre	5.11
Noviembre	4.93
Diciembre	4.81
Anual	5.57

- Ángulo óptimo de paneles solares: Según la literatura consultada, existen tres ángulos adecuados para la instalación de paneles solares que pueden variar según el objetivo/temporada (Mehleri et al., 2010). Esto se resume en la Tabla 4.

Tabla 4 Ángulos óptimos para el caso de estudio

Condición	Inclinación Óptima	Explicación
Promedio anual	19°	Igual a la latitud de Puebla.
Invierno	29°	Latitud + 10° (19° + 10° = 29°). Maximiza la captación en meses de menor sol.
Verano	9°	Latitud - 10° (19° - 10° = 9°). Maximiza la captación en meses de mayor sol.

Se ha seleccionado un ángulo de inclinación fijo de 19° para maximizar la irradiación solar anual total captada, eliminando la necesidad de ajustes estacionales en la orientación de los módulos fotovoltaicos.

2.2 Elección del cultivo.

La selección del cultivo se realizó considerando la viabilidad económica y la seguridad alimentaria de la comunidad, buscando un equilibrio entre ambas. Para este propósito, se consultaron los reportes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con los principales cultivos del estado de Puebla (INEGI, 2023), presentados en la Tabla 5.

Tabla 5 Principales cultivos del estado de Puebla 2022

Cultivo	Producción (toneladas)	Superficie sembrada (hectáreas)
Maíz grano blanco	512143	512656
Maíz forrajero	233474	10209
Brócoli	128680	9780
Cebolla	101498	5858

No obstante, dado que los reportes son a nivel estatal y el suelo de la región sur de Puebla presenta características distintas, la selección se limitó a los cultivos adecuados para el área de estudio. Según reportes, los cultivos viables en la zona son el maíz, frijol y el cacahuate (Gobierno, s.f.). De estos, se optó por el maíz forrajero por ser de los más populares para cumplir con los criterios de viabilidad económica y seguridad alimentaria.

2.3. Cálculo de necesidades hídricas.

Para el cálculo de las necesidades hídricas se basa en la metodología FAO-56, utilizando el software de uso gratuito CropWat 8.0. Se consideran condiciones climáticas de la Mixteca Poblana, con datos de temperatura, humedad, viento, insolación y precipitación obtenidos de la base de datos de (POWER | DAV, s.f.).

El ciclo del cultivo se definió en 140 días, con una fecha de siembra del 26 de marzo y condiciones de región árida. Los coeficientes de cultivo (Kc) variaron entre 0.7 y 2.0 a lo largo de las etapas fenológicas, mientras que la profundidad radicular alcanzó 120 cm, con un agotamiento crítico del 55%. La evapotranspiración de referencia (ETo) se estimó en 8.9-9.3 mm/día en los meses críticos (Allen et al., 1998).

Teniendo en cuenta los datos anteriores, la necesidad hídrica por hectárea de maíz forrajero resulta ser de un total de 3021m^3 de agua en los 140 días que dura el ciclo de cultivo. Esto significa que la necesidad hídrica diaria por hectárea de maíz es de 21.58$\frac{m^3}{dia}$.

Actualmente, la técnica de riego por gravedad es la más común. Sin embargo, con apenas un 50% de eficiencia se requerirían de 43.16m^3 agua al día para cubrir la necesidad hídrica de una hectárea, lo que resulta excesivo, especialmente en zonas rurales de escasos recursos. Dado que la fuente de agua disponible no podría cubrir esta, se optó por reducir el terreno de estudio a solo media hectárea, conservando la necesidad de 21.58m^3 de agua diarios ($Requerimiento_{hídrico}$).

2.4. Determinación de la potencia de la bomba.

2.4.1 Selección de tipo de la bomba

Para la selección de una bomba centrífuga sumergible, esta selección se encuentra ampliamente respaldada en la literatura, ya que representa el 53% de las soluciones para los sistemas de bombeo aislado. Esto por diversos motivos tales como:

- Alta eficiencia en pozos profundos (Oladele, 2023).
- Bajo mantenimiento y larga vida útil (Parveen, Sharma and Singh, 2021).
- Compatibilidad con controladores de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y variadores de velocidad (VSD), lo que es crucial para maximizar la energía extraída de los paneles solares (Gasque *et al.*, 2022).
- Gran resistencia en condiciones adversas (Gimeno-Sales *et al.*, 2020).

2.4.2 Cálculo de la potencia requerida

Para dimensionar la potencia, se debe calcular primero el caudal instantáneo. Asumiendo un funcionamiento promedio de 4 horas al día, equivalente a las horas pico de sol efectivas para bombeo (POWER | DAV, s.f.), y una altura de succión de riego de 6.9 m más 6 m de altura adicional se contemplan 13 m, como se muestra en la Ecuación 1.

$$Q = \frac{Requerimiento_{hidrico}}{horas_{operacion} * 60\frac{min}{h}} = 74.8\ L/min \quad (1)$$

Considerando que el caudal presentado es más cercano al de las bombas de 1 hp (70 L/min), se mantendrá esta selección, aun sabiendo que se requiere un poco más de tiempo para el bombeo del agua.

Debido a que las horas de bombeo (las de mayor irradiación solar, de 9:00 a.m. a 2:48 p.m.) no coinciden con las horas de riego (en la mañana y en la tarde), es necesario instalar un

tanque de almacenamiento de agua. Sin embargo, incluso para un área de media hectárea, la demanda de agua es demasiado grande para un tanque de 25,000 litros, el cual solo podría abastecer un día.

Por estas razones, se hicieron las siguientes modificaciones:

- Riego directo: Riego programado en la mañana de 9:00 a.m. a 11:00 a.m. Para aprovechar las horas de sol de la mañana.
- El bombeo de 12:00 p.m. a 2:48 p.m. se destinará al tanque de almacenamiento.

Con estos cambios, se reduce la necesidad del tanque de almacenamiento de 25,000 litros a menos, debido a que una parte de la necesidad se cubrirá en la parte directa. Esta reducción se contempla en la Tabla 6.

Tabla 6 Cambio de la necesidad del tanque de almacenamiento

Concepto	Descripción	Cálculo
Volumen de bombeo (9-11a. m.)	Volumen total bombeado en 120 minutos	70L/min×120 min=8,400L
Volumen de bombeo (12:00 a 2:48 p.m.)	Volumen total bombeado en 168.6 minutos	70L/min×168.6 min=11,802L
Total, de agua bombeada con horario solar	Suma del volumen de bombeo en ambos periodos	8,400L+11,802 L=20,202L
Déficit	Diferencia entre el volumen total requerido y el volumen bombeado	21,580L−20,202 L=1,378L
Tiempo adicional requerido	Tiempo necesario para bombear el déficit de agua	1,378 L÷70 L/min=19.7 min≈20 min
Energía real requerida (Potencia)	Potencia necesaria para el bombeo	p_{real} =0.570×13×0.16 3=296 W
Energía requerida	Energía consumida por el bombeo adicional	296W× (6020 h) =98Wh

Con esta estrategia, se mantiene la capacidad de abastecimiento para media hectárea, pero se reduce la necesidad de un tanque de almacenamiento, optando por uno de 12,000 litros.

2.5. Cálculo de energía requerida.

Para el dimensionamiento del sistema, se ha optado por un enfoque conservador, evaluando el desempeño de los componentes en las condiciones más desfavorables (Catuogno et al., 2023). Por lo tanto, el análisis se realizó con los valores más bajos de potencia para los paneles solares.

En este estudio, se contempla un arreglo fotovoltaico compuesto por tres paneles de 150 W cada uno, dando un total de 450 W ($Potencia_{paneles}$). Se ha calculado que, con la irradiación promedio mensual más baja, este arreglo puede generar energía equivalente a 4.81 horas pico solares (Irradiación) horas pico solares (*POWER | DAV*, sf), este valor se representa como la energía generada en condiciones desfavorables con 70% (n) de eficiencia dictados por la Ecuación 2.

$$Potencia_{paneles} * Irradaicon * n = 1515\ Wh \quad (2)$$

Para conocer la energía consumida se requiere la energía consumida de la bomba (P_{real}) por las horas de operación ($horas_{operacion}$) como se define en la Ecuación 3.

$$P_{real} * horas_{operacion} = 1424\ W \quad (3)$$

Se contempla una mayor generación de energía que la consumida, por lo tanto, se concluye que los tres paneles son suficientes para el sistema de bombeo.

2.6. Estudio técnico y financiero.

El costo estimado de inversión para el dimensionamiento e implementación integral del sistema se proyecta en un rango de $60,000 a $90,000 MXN. Esta variación se debe a las condiciones iniciales de las comunidades beneficiarias. Específicamente, el límite inferior del rango ($60,000 MXN) considera escenarios donde la comunidad ya dispone de infraestructura preexistente, como cisternas o componentes de almacenamiento, lo que reduce el alcance de la adquisición de nuevos equipos. El rango completo de costos, detallando la composición por componente, se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7 Precio de los componentes.

Componentes	Precio
3 paneles de 150W	$5,400.00
Estructura de paneles solares a 19° 2 metros de alto y 3 paneles	$4,026.00
Inversor	$16,000.00
Plomería	$2,000.00
Bomba	$2,700.00
Baterías	$11,000.00
Mano de obra para la instalación	$5,748.00
Material para su instalación	$8,146.00
Caja de seguridad 3 x 3 m	$2,000.00
Tanque de almacenamiento 12 m^3	$33,000.00
Total	$90,020.00

En términos de viabilidad económica, se proyecta que la producción de media hectárea (0.5 ha) de maíz forrajero alcanza un rendimiento de 3.75 toneladas por ciclo. Con base en el precio de venta garantizado de $6,278 MXN por tonelada establecido en 2022 ("Anuncia Agricultura nuevo precio de garantía para pequeños productores de maíz en el 2022", s.f.), el ingreso bruto por ciclo asciende a $23,542 MXN.

Considerando un costo de producción por media hectárea de maíz forrajero de $10,770 MXN por ciclo y la posibilidad de realizar dos ciclos de cultivo anuales. Se presenta en la Tabla 8 lo necesario para una inversión de la producción del maíz y de un sistema de bombeo, con una recuperación en el 3.º o 4.º año.

Tabla 8 Flujo de caja del sistema de bombeo.

Año	Inversión necesaria	Ganancias anuales
1°	$90,020 + $21,540	$47,084.00
2°	$64,476 + $21,540	$47,084.00
3°	$39,932 + $21,540	$47,084.00
4°	$13,388 + $21,540	$47,084.00
5°	Recuperación completa	$47,084.00

3. Resultados.

Como resultado de este análisis se pudo comprobar que el diseño del sistema solar aislado en la ubicación de la Mixteca Poblana demostró ser viable y económicamente competitivo frente a la extensión de la red eléctrica.

3.1 Dimensionamiento técnico

- Sistema fotovoltaico: Se dimensionó un arreglo de 3 paneles de 150 W (450 W en total), capaz de generar 1515 Wh/día incluso en el mes de menor irradiación (diciembre, 4.81 kWh/m²/día). Este excedente de energía (≈6.4% sobre los 1424 Wh requeridos) asegura la operación del sistema aún en condiciones adversas.

- Estrategia de bombeo: La división del bombeo en dos ventanas horarias (9:00-11:00 y 12:00-14:48) redujo la capacidad requerida del tanque de almacenamiento de 25,000 L a 12,000 L, representando una solución adecuada para las comunidades aisladas.

- Sistema de respaldo: El déficit diario de 1,378 L se cubre con un banco de baterías de 12V y 200Ah, utilizando solo el 5% de su capacidad diaria, lo que garantiza una larga vida útil del sistema de almacenamiento.

3.2 Viabilidad económica

Retorno de la inversión: El cultivo de maíz forrajero en media hectárea genera ingresos de $47,084 MXN anuales (2 ciclos/año). Considerando los costos de producción.

La inversión en el sistema de bombeo solar se recuperaría entre el tercer año a cuarto año.

4. Conclusiones

Este estudio demostró que la implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico aislado en la Mixteca Poblana representa una alternativa técnica y económicamente viable para la comunidad, superando ampliamente a la extensión de la red eléctrica.

En el ámbito técnico, se validó que un sistema compuesto por tres paneles de 150 W, una bomba sumergible de 1 hp y un banco de baterías de respaldo garantiza el suministro de agua para media hectárea de maíz forrajero, incluso bajo condiciones climáticas adversas. La estrategia de bombeo en dos ventanas horarias demostró ser viable para reducir la capacidad del tanque de almacenamiento de 25,000 L a uno de 12,000 L, lo que permite que sea más accesible para los pequeños ganaderos.

Económicamente, el sistema fotovoltaico presenta una ventaja competitiva frente a la extensión de la red, con una relación costo-beneficio de 1:1.75. La inversión inicial de $60,000–$90,000 MXN se recupera entre el tercer y cuarto año mediante la producción de maíz forrajero, generando ingresos anuales de $47,084 MXN. Este modelo demuestra ser financieramente accesible para pequeños productores.

El impacto social y ambiental trasciende lo económico: el sistema provee seguridad hídrica, alimentaria y energética, y debido a su alta replicabilidad y fácil acceso, se promueve la reducción de la dependencia de combustibles fósiles.

5.Referencias

Access to Energy - Our World in Data' (s.f.). Disponible en: https://ourworldindata.org/energy-access (Consultado: 15 abril 2025).

Allen, R. et al. (1998) 'FAO Irrigation and drainage paper No. 56', Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56, pp. 26–40.

Anuncia Agricultura nuevo precio de garantía para pequeños productores de maíz en el 2022 | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx (s.f.). Disponible en: https://www.gob.mx/agricultura/prensa/anuncia-agricultura-nuevo-precio-de-garantia-para-pequenos-productores-de-maiz-en-el-2022 (Consultado: 15 abril 2025).

Catuogno, G. et al. (2023) 'Water and Solar Energy for Humanitarian Aid in Rural Communities in the Argentine Chaco', en 2023 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), pp. 66–69. Disponible en: https://doi.org/10.1109/GHTC56179.2023.10354830.

Contigo, C. (2022) Contratación para Clientes de Tarifa Doméstica.

Gasque, M. et al. (2022) 'Energy Efficiency Optimization in Battery Based Photovoltaic Pumping Schemes', IEEE Access,

10, pp. 54064–54078. Disponible en: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175586.

Gimeno-Sales, F.J. et al. (2020) 'Pv monitoring system for a water pumping scheme with a lithium-ion battery using free open-source software and iot technologies', Sustainability (Switzerland), 12(24), pp. 1–28. Disponible en: https://doi.org/10.3390/su122410651.

Gobierno (s.f.) Se incrementa producción de maíz con alternativas de labranza en la Mixteca Poblana | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx. Disponible en: https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-incrementa-produccion-de-maiz-con-alternativas-de-labranza-en-la-mixteca-poblana (Consultado: 14 abril 2025).

HAASE, G. et al. (2023) 'Designing optimal solar water pumping stations for irrigation of agricultural lands', Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES), 32(3), pp. 270–283. Disponible en: https://doi.org/10.22630/srees.4994.

Ibrahim, S., Ghetany, H.H. and Shabak, A. (2020) 'Comprehensive Design Tool for Sizing Solar Water Pumping System in Egypt', Applied Solar Energy, 56, pp. 18–29. Disponible en: https://doi.org/10.3103/S0003701X20010053.

INEGI (1998) 'México en cifras'.

INEGI (2023) Resultados Definitivos del Censo Agropecuario en el Estado de Puebla.

Masera, J.O. and Torres-Wong, M. (2020) Sistemas Energéticos Rurales Sustentables. Disponible en: https://www.conacyt.gob.mx/images/pronaces-seminario-web/Webinario_Sistema_energetico_rurales_final.pdf.

Mehleri, E.D. et al. (2010) 'Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays', Renewable Energy, 35(11), pp. 2468–2475. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.006.

Oladele, A.K. (2023) 'Assessment of Performance of Solar Powered Direct Current (D.C) Water Pumps for Boreholes in Kaduna and itsEnvirons', International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering, 9(9), pp. 27–39. Disponible en: https://doi.org/10.31695/ijasre.2023.9.9.5.

Orts-Grau, S. et al. (2021) 'Photovoltaic Water Pumping: Comparison Between Direct and Lithium Battery Solutions', IEEE Access, 9, pp. 101147–101163. Disponible en: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097246.

Parveen, H., Sharma, U. and Singh, B. (2021) 'Solar Water Pumping System with Captive Energy Storage Functionality', en 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 186–191. Disponible en: https://doi.org/10.1109/ECCE47101.2021.9595869.

POWER | DAV (s.f.). Disponible en: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (Consultado: 14 abril 2025).

Study of Expired Medications as Copper Corrosion Inhibitors.

E.J. Moreno-Carpintero* R. López Sesenes*M.A. Chagolla-Aranda** H. Coello-Sánchez** E. Vázquez-Altamirano* S. Martínez-López***

Tecnológico Nacional de México/I.T. Zacatepec, Departamento de MetalMecánica, Zacatepec Morelos, México, C.P. 62780 (Tel. 7343432111, e-mail: (enrique.mc@zacatepec.tecnm.mx, miguel.cg@zacatepec.tecnm.mx, L25090685@zacatepec.tecnm.mx, L25090615@zacatepec.tecnm.mx)

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (Tel: 777 362 7770, ext:414; e-mail: (miguel.ca@cenidet.tecnm.mx, d23ce140@cenidet.tecnm.mx)*

**Universidad del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México (Tel: 777 3297000, ext:2089; e-mail: (rlopez@uaem.mx)*

Abstract: In this paper, we investigated the use of expired medications as corrosion inhibitors for copper. Cinitrapide, the expired medication, was used as our inhibitor. It is prepared at different parts per million (ppm) to determine which medium is most susceptible to corrosion. Copper samples are also prepared by immersing them in 3.5% NaCl. Electrochemical tests include Open Circuit Potential (OCP), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), and Polarization Curves (PC).

Keywords: Copper, Expired Drug, Electrochemical Impedance, Polarization Curves, Open Circuit Potential.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que el costo por problemas de corrosion es muy alto, un estudio de la NACE International, la autoridad mundial en corrosion fundada en 1943, revela que el 3.4% del PIB global, se destina a labores de mantenimiento y reposición de materiales afectados por este fenómeno (*International Measures of Prevention , Application , and Economics of Corrosion Technologies Study*, n.d.)

La corrosión ocurre por la degradación del material expuesto a cualquier medio (acuoso, ambiente, tempratura, etc.), se da normalmente en un metal, y esta ocurrre al tener interacción en su entorno a través de la reacciones químicas y electroquímicas, esto se da debido la presencia de oxígeno, humedad, sales o ácidos. Actualente existen varios tipos de corrosión, según al medio que esten expuesta, pueden ser corrosión generalizada, corrosión por picadura, corrosión localizada, corrosión mixta, entre otras (Giniebra et al., 2018; Laurencio & Gola, 2024).

Por otro lado la corrosión es un fenómeno inevitable y solo puede controlarse mediante diferentes métodos. Las técnicas implementadas hoy en día, han contribuido a poder detectar los diferentes fenómenos de corrosión y el ambiente menos o más agresivo, según el material con el cual esta en contacto. Con dichas técnicas, se pretende tener un control más efectivo al implementar inhibidores, como protección de películas en los materiales, tratamientos térmicos, entre otros (Ghali et al., 2007; Zehra et al., 2022).

La búsqueda por reducir los efectos de corrosión se hace muy aguda, debido a que el costo suele incrementarse considerablente, sumando el daño ecológico que se causa al medio ambiente. Es por ello, que se investiga constantemente, cuál es la mejor forma de dar un equilibrio a todo este proceso. Las técnicas convencionales de mitigación de la corrosión, están dadas por la protección catódica y la protección anódica, así mismo el uso de recubrimientos que se aplican en la superficie de los metals (pinturas), creando una capa aislante. Sin embargo, el usar inhibidores ha funcionado eficientemente para el desaceleramiento de la corrosión, como una forma de protección a nivel molecular. Los inhibidores se clasifican en inorgánicos (siendo altamente dañino), y los orgánicos (teniendo menor grado de daño) (Tanwer & Shukla, 2022)

Actualmente la importancia de los inhibidores ha tomado gran fuerza gracias a su costo-beneficio, ya que pueden aplicarse directamente en el medio que causa la corrosión, reduciendo su velocidad significativamente, al metal que se le este aplicando. Para la industria petrolera ha contribuido fuertemente debido a la reducción de mantenimiento de ductos que conducen cualquier tipo de hidrocarburo (Carmona-Hernandez et al., 2023)

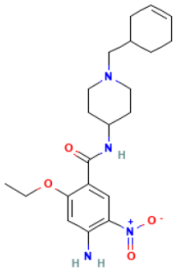
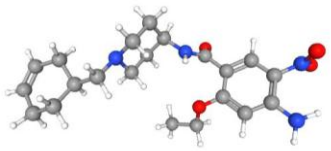
Los medicamentos caducados hoy en día se han convertido en un desecho que afecta gravemente a la población en México, estimando que hay más de 12 millones de estos productos que no son recuperados, propiciando una contaminación, poniendo en riesgo la salud del ser humano, ya que muchas veces se tienden a vender en mercados llamados negros, por no ser regulados (Ramírez-cano & Orozco-cruz, 2024).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1 Preparación del Inhibidor.
Como medio de inhibidor se uso un medicamento caducado de nombre cinitaprida, ver tabla 1.

Tabla 1. Características del medicamento Cinitaprida (*Cinitaprida - Wikipedia, La Enciclopedia Libre*, n.d.)

Forma molecular	C21H30N4O4
Sinónimos	Paxaprida, Cinitaprida, Cidina
Peso molecular	402,5 g/mol
Descripción	La cinitaprida es un agente gastroprocinético y benzamida antiulcerosa con actividad agonista de los receptores 5-HT1 y 5-HT4 y antagonista de los receptores 5-HT2. Se comercializa en España y México.
Grupo Farmacológico	Procinéticos
Estructura 2D	
Estructura 3D	

La cinitrapida para usarse como inhibidor, se disolvio en agua destilada con el fin de obtener una concentración de 10,000 ppm, manteniendo una agitación durante 24 horas para su total disulución.

2.1.2 Material utiilizado como eletrodo de trabajo.

El material a utilizar como electrodo de trabajo fue el Cu, se describe la tabla 2 su composión química (Smith & Larena Pellejero, 1998).

Tabla 2. *Características del Cu.* (Collins & Klevay, 2011)

Estado ordinario	Sólido
Densidad	8960 kg/m^3
Punto de fusión	1084,62 K (811 °C)
Punto de ebullición	2835 K (2562 °C) °C
Conductividad eléctrica	5.8108 × 10^7 S/m
Conductividad térmica	400 W/(m·K)

Para realizar la pruebas electroquímicas, se uso probetas rectangulares de cobre con área aproximada de 1 cm^2. Las probetas fueron cortadas y soldadas a un alambre de cobre que actúa como conductor eléctrico.

Así mismo se encapsularon las probetas empleando resina epóxica y se desbastaron con papel abrasive de carburo de silicio, se enjuagaron con agua destilada y etanol, secadas con aire caliente previo a la inversion en el electrólito con y sin contenido de inhibidor de prueba.

2.1.3 Preparación de Electrolito.

Para la preparación del electrolito se uso agua destilada, usando 35 g de NaCl para su mejor disolución, manteniéndose en agitación durante 24 hrs (ver figura 1).

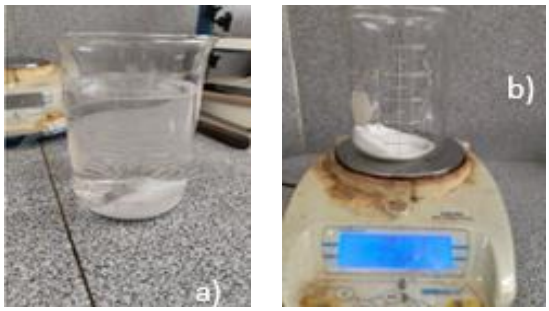


Figura 1. a) Agua destilada, b) Peso de 35 g de NaCl.

2.2 Caracterización del Farmaco caducado.

Para la caracterización de los fármacos se utiliza cromatografía de líquido de alta resolución (HPLC) con detector de UV. La fase móvil está constituida de una mezcla de acetonitrilo: agua (70:30), El flujo de fase móvil es de 1mL/min, volumen de inyección de 5 µL y longitud de onda de 247 a 667 nm. Este proceso de análisis se realiza con un fármaco caduco y otro no caduco, permitiendo observar si existe o no degradación o modificaciones en su composición. Además, se realiza un análisis por espectroscopia infrarroja (FTIR) para observar los grupos funcionales que se puedan encontrar en los medicamentos analizados, esto se realizará con un medicamento caduco y uno no caduco para observar el cambio en su espectro.

2.3 Prueba Electroquímica

Las pruebas electroquímicas se realizan en un Potenciostato Galvanostato marca Gill AC ACM Instruments a temperatura

ambiente. Se emplea una celda convencional de tres electrodos en la cual las probetas previamente encapsuladas son utilizadas como electrodos de trabajo, además de un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) como electrodo de referencia y como electrodo auxiliar un grafito en forma circular. Todas las pruebas se realizan en NaCl al 3.5 %, con y sin el contenido del fármaco anteriormente descrito como inhibidor de corrosión.

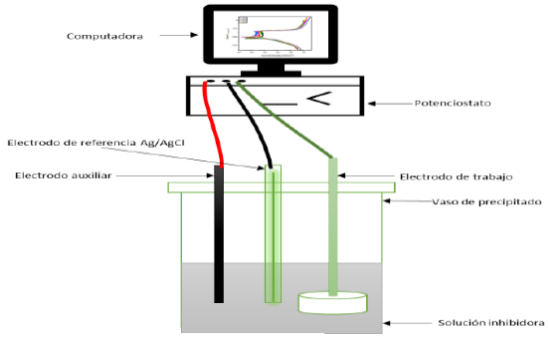


Figura 2. Arreglo experimental para pruebas Electroquímicas.

3. RESULTADOS

Los resultados OCP a temperatura ambiente durante 1 hr para evaluar con y sin contenido de inhibidor (Cinitaprida) se muestran en la figura 3, en donde podemos observar que para nuestra solución sin inhibidor nos da un potencial de -0.2 mV paroximadamente, al aplicar el inhibidor a 100 ppm hay un incremento al potencial de 0.149 mV, la mejor muestra fue la del inhibidor a 200 ppm, mostrando 0.25 mV.

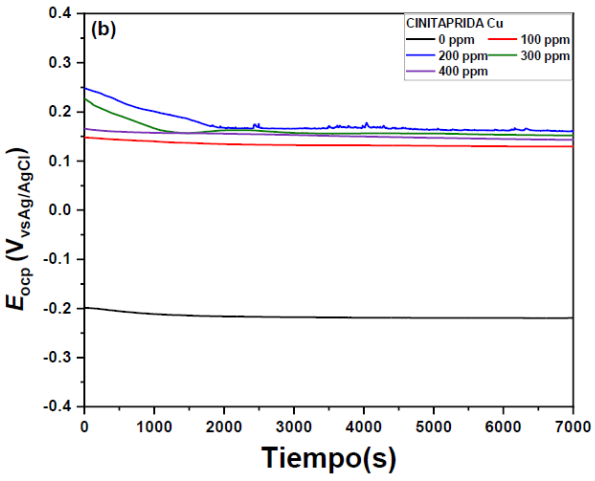


Figura 3. Resultados de OCP.

Para las pruebas de EIS, como podemos observar en la figura 4, aplicando el inhibidor de cinitaprida en Cu, el diagrama de Nyquist se observa que tanto el blanco y las concentraciones forman un semicírculo a altas frecuencias, las concentraciones de 200, 300 y 400 ppm nos muestra la formación de un semicírculo de bajas a medianas frecuencias.

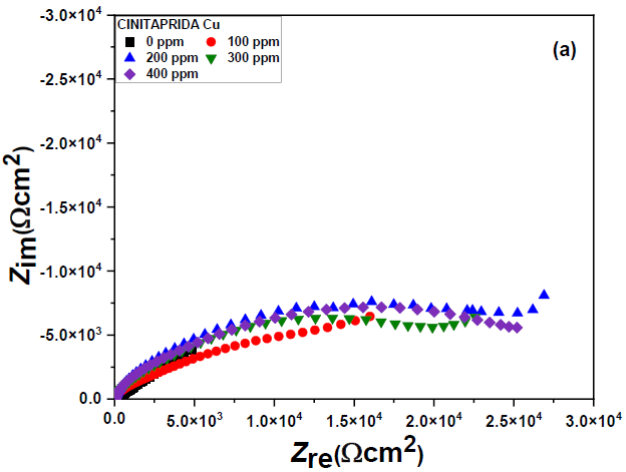


Figura 4. Evaluación del Cu con el Inhibidor Cinitaprida a diferentes concentraciones en NaCl al 3.5%.

En la figura 5, diagrama de bode podemos observar el comportamiento de los valores totales del módulo de impedancia (log |Z|) de las pruebas realizadas con y sin contenido de cinitaprida caducada, mostro que a las concentraciones de 200, 300 y 400 ppm presentan un valor de impedancia mayor con valores de 2.8x104 Ωcm^2, 2.3 x104 Ωcm^2 y 2.5x104 Ωcm^2 con respecto al blanco, el cual tiene un valor de impedancia de 6.1x103 Ωcm^2. En el ángulo de fase se observa un incremento en los valores de -65° a -70° para las concentraciones con cinitaprida caducada, las cuales son superiores al blanco el cual tiene un valor de 50°, se observa que las concentraciones tienen una constante de tiempo a medianas frecuencias desplazándose a bajas frecuencias.

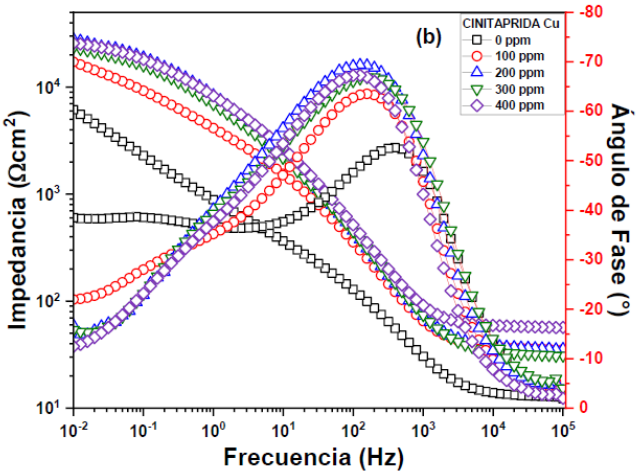


Figura 5. Diagrama de Bode para las diferentes concentraciones.

Para las Curvas de Polarización los valores más nobles se presenta en la concentración de 200 ppm, rectificando lo sucedido de las pruebas de OCP e EIS, y menos noble para cuando se realizo la prueba sin inhibidor, ver figura 6.

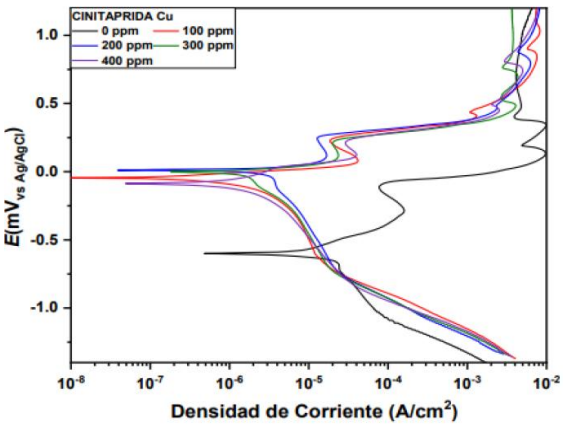


Figura 6. Curvas de polarización para las diferentes concentraciones.

4. CONCLUSIONES

El medicamento caducado (Cinitaprida) mostro buenos resultados como inhibidor, sobre todo cuando se realize dicha concentración a 200 ppm, en las técnicas usadas como OCP, EIS y CP, mostraron la congruencia para determinar que en todos los casos el mejor compartamiento fue para dicha concentración.

Al seguir utilizando estos farmacos caducados para la preparación de inhibidores nos da la pauta para contribuir a la huella de carbono en nuestro planeta, debido a que estos farmacos por ser caducados contaminan mucho y no se sabe en su totalidad en que lugar terminan, debido a que no saben como separarlos adecuadamente de la basura.

Por otra part el Cobre al ser un material clasificado dentro de los nobles, da la pauta para poder ser utlizado con este inhibidor y desacelerar el proceso de corrosion.

REFERENCIAS

Carmona-Hernandez, A., Campechano-Lira, C., Espinoza-Vázquez, A., Ramírez-Cano, J. A., Orozco-Cruz, R., & Galván-Martínez, R. (2023). Electrochemical and DFT theoretical evaluation of the Randia monantha Benth extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *147*, 104913. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104913

Cinitaprida - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved October 13, 2025, from https://es.wikipedia.org/wiki/Cinitaprida

Collins, J. F., & Klevay, L. M. (2011). Copper. *Advances in Nutrition*, *2*(6), 520–522. https://doi.org/10.3945/an.111.001222

Ghali, E., Sastri, V. S., & Elboujdaini, M. (2007). *Corrosion prevention and protection: practical solutions*. John Wiley & Sons.

Giniebra, J. J. C., Rigoberto, M., & Dominguez, J. A. D. (2018). Apuntes sobre corrosión y protección contra la corrosión. *N. o April*.

International Measures of Prevention , Application , and Economics of Corrosion Technologies Study. (n.d.).

Laurencio, D. I. M., & Gola, M. P. (2024). *Introducción al estúdio de la corrosión y la protección de metales*. Editorial Pueblo y Educación.

Ramírez-cano, J. A., & Orozco-cruz, R. (2024). *Concientifica*. *6*(2), 1–6.

Smith, W. F. ., & Larena Pellejero, A. (1998). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 715.

Tanwer, S., & Shukla, S. K. (2022). Recent advances in the applicability of drugs as corrosion inhibitor on metal surface: A review. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, *5*, 100227. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100227

Zehra, S., Mobin, M., & Aslam, R. (2022). Corrosion prevention and protection methods. In *Eco-Friendly Corrosion Inhibitors* (pp. 13–26). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91176-4.00023-4

Trends in New Manufacturing Methods for Sandwich Structures and their Influence on Mechanical Properties

Luis Alberto Orihuela Martinez*, Enrique Alcudia Zacarias*, Juan Antonio Paz González, Oscar Adrián Morales Contreras****

** Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Int. Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos, México. CP.62490.*

(m24ce088@cenidet.tecnm.mx), (enrique.az@cenidet.tecnm.mx).

*** Universidad Autónoma de Baja California/ Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Blvd. Universitario #1000. Unidad Valle de las Palmas. Tijuana, Baja California, México. C.P.21500*

(pazj@uabc.edu.mx), (moraleso97@uabc.edu.mx).

Abstract: In this work, an analysis of the literature on sandwich structures was carried out with the aim of analyzing how the type of additive manufacturing influences the mechanical performance of these structures when subjected to different load conditions. Fourteen articles on the design and manufacture of sandwich structures were analyzed and classified according to the type of material used in each component, the type of additive manufacturing, and the type of mechanical testing. The interpretation of the results revealed new manufacturing methods for sandwich structures, which can be classified into three groups: a) Manufacturing for ceramic or metallic materials, where the LPBF, EB-PBF, and SLM methods stand out, allowing for sandwich structures with high resistance to bending, compression, and impact; b) Manufacturing for polymeric materials, such as the FDM, FFF, and CFRC-FFF methods, which are more economical processes and facilitate the redesign of prototypes and final structures; and c) Adhesive manufacturing, specifically the VARTM and Co-bonding methods, which are notable for improving the bond between different plate and core materials. The main materials used in these manufacturing methods and their mechanical properties were also identified. Currently, the development of these new additive manufacturing methods has enabled the design of new shapes and geometries for sandwich structures. This has broadened the impact to new sectors of interest in industry, such as automotive, aerospace, leisure and sports, renewable energy, and marine. Furthermore, additive manufacturing has achieved significant technological advancements that have reduced environmental pollution and led to the development of new, more efficient machines.

Keyworks: Additive Manufacturing, Sandwich Structures, 3D Printing.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras tipo sándwich están conformadas por tres componentes, dos placas de un material de alta resistencia y un núcleo de baja densidad. Uno de los principios de diseñar estructuras ligeras es mantener y mejorar el desempeño mecánico, al disminuir la masa en la estructura. Actualmente en la manufactura de las estructuras se puede utilizar gran variedad materiales debido al crecimiento de nuevas técnicas de manufactura, como lo son materiales laminados compuestos y núcleos de diferentes geometrías por el avance que tenido la manufactura aditiva y las técnicas de diseño 3D (Ma *et al.*, 2021a).

El crecimiento en la aplicación de estas estructuras tipo sándwich ha permitido el desarrollo de nuevos diseños con mejor eficiencia y reducción de costos para la industria aeroespacial, aeronáutica, naval y automotriz. Estas estructuras, en condiciones de trabajo son sometidas a diferentes tipos de cargas como son: Torsión, Compresión Axial, Flexión, Impacto, etc. Por lo cual, durante el proceso de diseño y manufactura se deben alcanzar propiedades optimas en resistencia, rigidez a flexión y compresión, impacto, vibraciones y ligereza. La resistencia y la rigidez a flexión en estas estructuras se encuentran determinadas por la geometría y el material de las dos placas exteriores que son de materiales resistentes y un núcleo que permite obtener una alta oposición de deformación al aplicar una carga (Sun *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2021b). Con respecto a la ligereza, esta reducción de peso en la estructura se obtiene al usar un núcleo con un material de baja densidad (Feng *et al.*, 2020). Los diseños de los núcleos se pueden dividir en cuatro categorías. En la primera categoría se encuentran los núcleos sólidos, celulares o núcleos de espumas. En la segunda categoría se encentran los núcleos de panal en 2D. En la tercera categoría están los núcleos reticulares. Por último, en la cuarta categoría se encuentran los núcleos de tipo superficie (Yin *et al.*, 2023).

Actualmente, la manufactura aditiva ha revolucionado este tipo de estructuras sándwich creando núcleos de muy baja densidad y placas con mejores propiedades mecánicas, las cuales permiten una mejor eficiencia y resistencia en su funcionamiento (Wannarong and Singhanart, 2022). Por ejemplo, (Guerra Silva and Morales Pavez, 2025) desarrolló estructuras sándwich mediante la manufactura de fabricación por filamento fundido (FFF) y compuesto reforzado con fibra

continua (CFRC-FFF), y a través de este tipo de manufactura obtuvieron un aumento de las propiedades mecánicas en un intervalo del 20% hasta un 70% dependiendo la clasificación de las fibras y su colocación al realizar la manufactura la pieza.

A continuación, se presenta una revisión de investigaciones reportadas en la literatura sobre estructuras sándwich, con el propósito de analizar cómo influye el tipo de manufactura aditiva en el desempeño mecánico de estas estructuras al ser sometido a diferentes condiciones de carga.

2. METODOLOGÍA

En esta revisión de la literatura se analizaron quince artículos sobre el diseño y manufactura de estructuras sándwich. En la **Tabla 1** se muestran estos artículos clasificados por el tipo de material utilizado en cada uno de los componentes de la estructura sándwich, tipo de manufactura aditiva, tipo de ensayo mecánico y resultados en resistencia obtenidos.

Tabla 1. Se muestra información sobre los artículos analizados sobre estructuras sándwich, materiales que se usaron y tipos de manufactura.

Autor	Año	Material de placas	Material del núcleo	Tipo de núcleo	Tipo Manufactura adictiva	Tipo Prueba	Resistencia (MPa)
Dechawat Wannarong	2021	CFRP Y GFRP	ABS Y PLA	Chiral truss, Re-entrant Honeycomb, Honeycomb, Truss	FDM	Flexión tres puntos	20.35
Quanjin Ma	2021	Fibras de E-glass CFRP	ABS Y PLA	Panal de Abeja y Armandura	VARTM	Compresión	165.61
Xu Zhang	2023	PLA	PLA	Quasi-Honeycomb	FDM	Flexión tres puntos	32
Y. Han	2024	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Simple Cubic (SC) y Rhombic Dodecahedron (RD)	EB-PBF	Flexión tres puntos	400
Yihao Wang	2024	CFRP	PLA	Octet y Hybrid	FDM	Flexion tres puntos	11.64
Emre Dereli	2024	CFRP	AlSi10Mg	Honeycomb	LPBF	Flexión tres puntos	384.56
Chenglin Tao	2024	Acero inoxidable 316L en polvo	Acero inoxidable 316L en polvo	EBCC	SLM	Flexión tres puntos	180
Rafael Guerra Silva	2025	Onyx y CFRC	CFRC	Honeycomb	CFRC-FFF	Flexión	75
Zhe Ma	2025	CFRP/Elastomer	Nomex	Honeycomb	Co-bonding	Impactos a baja velocidad	120
Eric Bol	2025	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Gyroid (G) TPMS, Primitive, Octet y kelvin	EB-PBF	Flexion de cuatro puntos	150
Yaozhong Wu	2025	Nylon PA12 CF	Nylon PA12 CF	Gyroid (G) TPMS	FDM	Flexión tres puntos	180.5
Changle Zhang	2025	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	BCC	LPBF	Airburst Explosion Test (Presión)	300
ZHLJIA	2025	Polvo Inconel 718	Polvo Inconel 718	X-TYPE	SIM	Compresión	300
Yu Qiu	2025	Fibras de E-glass	Divinycell H8	Espuma	VARTM	Flexion a cuatro puntos	55.22
Wei Zhao	2025	CFRP	Al2024	Honeycomb	VARTM	Flexión tres puntos	150

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Figura 1** se muestra la resistencia mecánica reportada en la literatura en las estructuras sándwich en función del tipo de material y tipo de manufactura aditiva. Esta gráfica nos permite visualizar los principales tipos de manufactura que son utilizadas para el diseño de estructuras sándwich. Por otro lado, es importante destacar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la fabricación de estas estructuras (**Figura 2**)

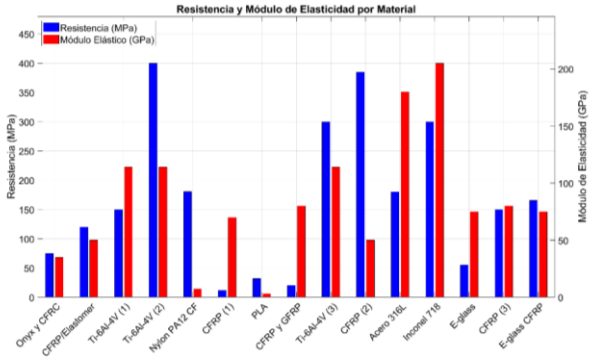


Figura 2. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la fabricación de las estructuras sándwich

La manufactura aditiva se puede clasificar en función de la tecnología y material utilizado para la fabricación de las estructuras. A continuación, se analizarán los métodos de manufactura clasificados para materiales metálicos, polímeros y por el método de adhesión.

3.1 Manufactura para materiales cerámicos o metales

La manufactura por **Fusión por láser en Lecho de Polvo (Laser Powder Bed Fusion (**LPBF**)** se realiza por medio de un láser que permite sinterizar materiales granulares formando capas finas hasta formar un diseño en 3D en un sólido (**Figura 3**). Su área de aplicación se encuentra en la industria de la medicina, aeroespacial y automotriz, principalmente al permitir desarrollo de piezas con geometrías complejas. Las ventajas de este método de manufactura se centran en acabados muy finos con más detalle y resaltados, entregando piezas metálicas con una mejor resistencia y densidad. Con respecto a sus ventajas, se tiene un consumo excesivo de material y un alto costo de manufactura. Para sus tiempos de producción pueden se moderados o largos dependiendo de la complejidad de la pieza.

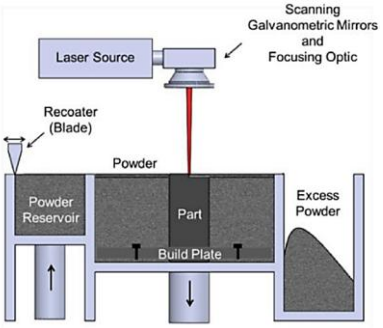


Figura 3. Manufactura por Fusión por láser en Lecho de Polvo (En ingles Laser Powder Bed Fusion LPBF) (Bandyopadhyay and Bose, 2016).

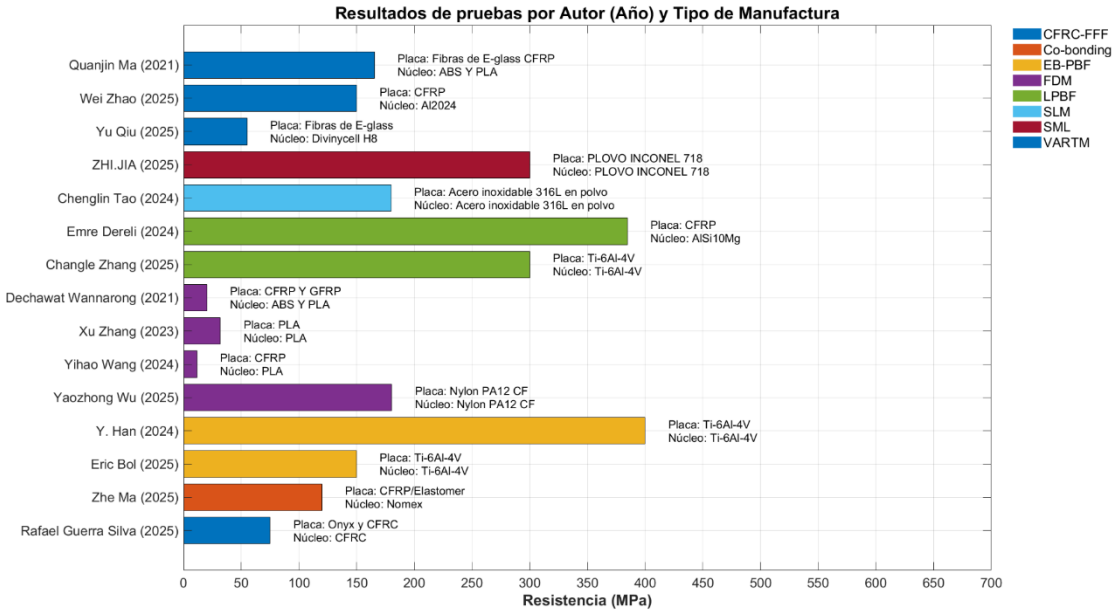


Figura 1. Resistencia mecánica reportada en la literatura en las estructuras sándwich en función del tipo de material y tipo de manufactura aditiva

(C. Zhang et al., 2025a) utilizó la manufactura aditiva LPBF para desarrollar estructuras sándwich de placa y núcleo fabricados con el material Ti-6Al-4V. Estas estructuras alcanzaron una resistencia cercana a los 300 MPa en una prueba de presión. En la **Figura 4** se muestra un esquema de la estructura sándwich utilizada.

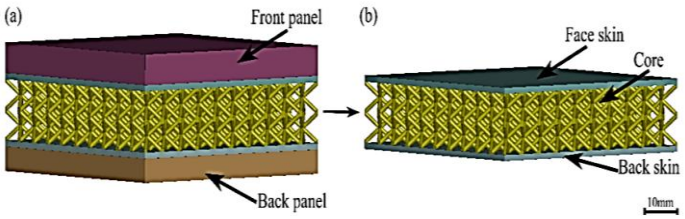


Figura 4. Ejemplo de estructura sándwich obtenida por la manufactura LPBF (C. Zhang et al., 2025b).

Por otro lado, la manufactura **por Fusión de Lecho de Polvo con Haz de Electrones (EB-PBF)** utiliza un haz de electrones para fundir cuidadosamente las partículas de polvo cerámico o metálicas, haciendo una colocación capa por capa del material hasta terminar una pieza solida (**Figura 5**) (Liu et al., 2021a). Su mayor aplicación se encuentra en la industria aeroespacial y naval, permitiendo dar uso amplio al titanio y a otros metales con altas propiedades mecánicas. Las ventajas de este método de manufactura se centran en generar mejores aleaciones en metales y disminuyendo las tenciones residuales. Su desventaja se centra en altos costos de manufactura y la necesidad de una cámara de vacío para poder realizar la manufactura.

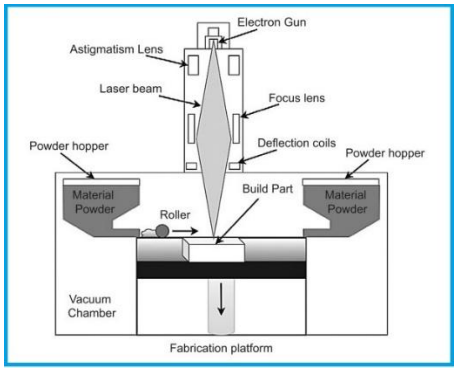


Figura 5. Manufactura por Fusión de Lecho de Polvo con Haz de Electrones (EB-PBF) (Liu et al., 2021b).

(Han *et al.*, 2024) utilizó la manufactura adictiva EB-PBF para el diseño de estructuras sándwich del material Ti-6Al-4V. Estas estructuras alcanzaron una resistencia cercana a los 400 MPa en una prueba de flexión. En la **Figura 6** se muestra una imagen de la estructura sándwich utilizada.

Figura 6. Estructura sándwich obtenida por la manufactura EB-PBF (Han et al., 2024).

En esa misma línea, la manufactura por utiliza un láser de alta capacidad para fusionar y fundir capa por capa en sucesión de polvo metálico (Tao *et al.*, 2024). Su aplicación se encuentra en partes de motores aeroespaciales, prótesis e implantes. Las ventajas de este método de manufactura se encuentran el diseño de formas complejas, obtención de

densidad gradual y alta precisión. Su desventaja se centra en los altos costos de manufactura y tratamientos térmicos. Por ejemplo, (Z. jia Zhang et al., 2025a) utilizó la manufactura adictiva SLM para desarrollar las estructuras sándwich de Iconel 718, del cual obtuvo una resistencia de 300 MPa en una prueba de compresión. En la **Figura 7** se muestra el proceso de manufactura de esta estructura sándwich.

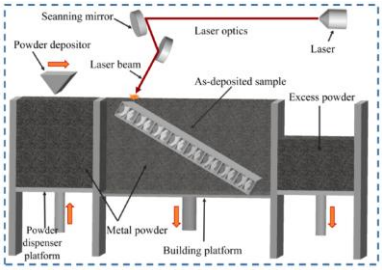


Figura 7. Esquema del proceso de fabricación de las estructuras sándwich por el método de manufactura SLM (Z. jia Zhang et al., 2025b).

3.2 Manufactura para materiales poliméricos

La manufactura por **Modelado por Deposición Fundida (FDM, Fused Deposition Modeling)** permite realizar la manufactura al agregar calor al material termoplástico, y posteriormente por un proceso de extrusión se coloca capa por capa (**Figura 8**)(Wang *et al.*, 2024). Su área de aplicación de centra en el diseño de piezas funcionales y de prototipado. Sus ventajas se encuentran en la facilidad de crea cualquier tipo de pieza mediante la adicción de material, lo cual permite usar varios materiales que sean termoplásticos, y bajos costos de manufactura.

Figura 8. Manufactura por Modelado por Deposición Fundida (FDM, Fused Deposition Modeling) (Bandyopadhyay and Bose, 2016).

(Zhang *et al.*, 2023) utilizó la manufactura adictiva FDM para desarrollar las estructuras sándwich de placa y núcleos fabricados con el material PLA. Estas estructuras alcanzaron una resistencia de 32 MPa en una prueba de flexión. En la **Figura 9** se muestra un ejemplo de la estructura sándwich fabricada.

Figura 9. Ejemplo de estructura sándwich obtenida por la manufactura FDM (Zhang et al., 2023).

Por otro lado, la manufactura por **Fabricación por filamento fundido (FFF) Compuesto reforzado con fibra continua (CFRC-FFF)** consiste en fundir el material termoplástico y se coloca capa por capa, agregando un refuerzo en caliente con fibra continuas como lo son el Kevlar, fibras de carbono o fibras de vidrio (**Figura 10**) (Guerra Silva and Morales Pavez, 2025). Sus aplicaciones se encuentran en el desarrollo de moldeado en 3D y piezas más ligeras. Su ventaja se encuentra en la presencia de fibras que permiten mejorar la resistencia y rigidez que las piezas fabricadas con FFF normal.

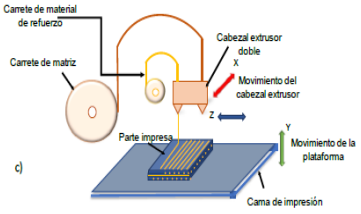


Figura 10. Fabricación por filamento fundido (FFF) Compuesto reforzado con fibra continua (CFRC-FFF) (Bandyopadhyay and Bose, 2016).

(Guerra Silva and Morales Pavez, 2025a) utilizó la manufactura adictiva **CFRC-FFF** para desarrollar las estructuras sándwich de placa y núcleo fabricados con el material Onyx y CFRC. Estas estructuras alcanzaron una resistencia a flexión de 75 MPa. En la **Figura 11** se muestra un esquema de la estructura sándwich utilizada.

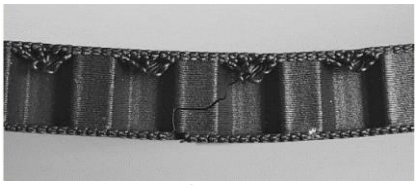


Figura 11. Ejemplo de estructura sándwich obtenida por la manufactura CFRC -FFF (Guerra Silva and Morales Pavez, 2025b).

3.3 Manufactura por adhesión

En las secciones anteriores se describieron estructuras sándwich conformadas por el mismo material tanto en las placas como en los núcleos. Sin embargo, en el análisis de los datos recopilados se encontró que existen métodos de manufactura que permiten crear estructuras sándwich con componentes de diferentes materiales, a través de un proceso de adhesión entre placas y núcleos.

La manufactura por **Moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM)** y el método por **Co-bonding** permite adherir placas y núcleos de diferentes materiales. Esta manufactura consiste en colocar adhesivos fusionables entre los componentes de interés. Posteriormente, se aplica presión o calor para crear una unión entre las placas y núcleo de la estructura sándwich (Bandyopadhyay and Bose, 2016) (Ma *et al.*, 2025). Su aplicación se encuentra en estructuras como palas eólicas, aeronaves, y marinas. Las ventajas de estos métodos de manufactura se centran en generar una gran adherencia entre los componentes del sándwich, permitiendo mejorar sus propiedades mecánicas.(Zhao et al., 2025a) utilizó la manufactura por adhesión para desarrollar las estructuras sándwich de CFRP/Aluminio (**Figura 12**), los cuales obtuvieron una resistencia a flexión de 150 MPa.

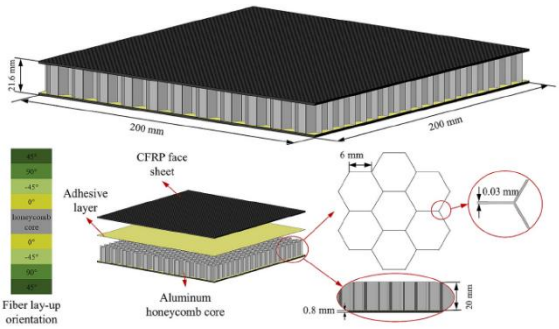


Figura 12. Estructura sándwich de CFRP/Aluminio obtenida por la manufactura por adhesión (Zhao et al., 2025b).

4. CONCLUSIONES

La revisión de la literatura permitió analizar las tendencias en la fabricación de las estructuras sándwich. En este sentido, el crecimiento de nuevas tecnologías en la manufactura aditiva ha permitido el diseño de nuevas formas y geometrías de núcleos. Estos métodos de manufactura se pueden clasificar en tres grupos: a) Manufactura para materiales cerámicos o metales, donde destacan los métodos **LPBF, EB-PBF** y **SLM**, los cuales permiten obtener estructuras sándwich con alta resistencia a flexión, compresión e impacto; b) Manufactura para materiales poliméricos, tales como, el método **FDM, FFF** y **CFRC-FFF**, los cuáles son procesos más económicos y permiten fácilmente el rediseño de los prototipos y estructuras finales; y c) Manufactura por adhesión, ya sea el método **VARTM** y **Co-bonding**, los cuales destacan principalmente por mejorar la unión entre diferentes materiales de placas y núcleos.

Se observó que los métodos de manufactura **LPBF, EB-PBF, SLM, FFF, CFRC-FFF, VARTM y Co-bonding** tienden a ser más costosos debido al tipo de tecnología que utilizan, los espacios de trabajo requeridos, los materiales de construcción y el tiempo de producción. Este último factor puede variar de moderado a prolongado, dependiendo la complejidad de la pieza al manufacturar. Por otro lado, se encontró que la manufactura **FDM** es ampliamente utilizada por sus bajos costos de producción y cortos tiempos manufactura. Esto permite crear prototipos y estructuras de bajo costo, lo que facilita los procesos de diseño.

Actualmente, la aparición de nuevas tecnologías y métodos de manufactura de estructuras sándwich ha permitido ampliar el impacto a nuevos sectores de interés en la industria, tales como, automotriz, aeroespacial, ocio y deporte, energías renovables y naval.

AGRADECIMIENTOS

Luis Alberto Orihuela Martinez agradece a al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado a través de la beca No. CVU: 2046246 y hacer posible un posgrado.

REFERENCIAS

Bandyopadhyay, Amit. and Bose, Susmita. (2016) *Additive manufacturing*. CRC Press.

Feng, Y. *et al.* (2020) "Creative design for sandwich structures: A review," *International Journal of Advanced Robotic Systems*. SAGE Publications Inc. Available at: https://doi.org/10.1177/1729881420921327.

Guerra Silva, R. and Morales Pavez, G. (2025) "Flexural characteristics of additively manufactured continuous fiber-reinforced honeycomb sandwich structures," *Composites Part C: Open Access*, 16. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100563.

Han, Y. *et al.* (2024) "The investigation on the bending fatigue properties of Ti–6Al–4V lattice sandwich structures fabricated EB-PBF," *Journal of Materials Research and Technology*, 33, pp. 3163–3173. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.023.

Liu, G. *et al.* (2021) "Additive manufacturing of structural materials," *Materials Science and Engineering R: Reports*. Elsevier Ltd. Available at: https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596.

Ma, Q. *et al.* (2021a) "A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels," *Journal of Composite Materials*. SAGE Publications Ltd, pp. 2513–2555. Available at: https://doi.org/10.1177/0021998321990734.

Ma, Q. *et al.* (2021b) "A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels," *Journal of Composite Materials*. SAGE Publications Ltd, pp. 2513–2555. Available at: https://doi.org/10.1177/0021998321990734.

Ma, Z. *et al.* (2025) "Multiple impacts behavior of Nomex honeycomb sandwich structures with elastomer-enhanced CFRP skins," *Thin-Walled Structures*, 216. Available at: https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113642.

Sun, Y. *et al.* (2018) "Bending behavior of composite sandwich structures with graded corrugated truss cores," *Composite Structures*. Elsevier Ltd, pp. 446–454. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.043.

Tao, C. *et al.* (2024) "Design of lattice metamaterials under the equal strength concept and research on the mechanical properties of their sandwich structures," *Thin-Walled Structures*, 205. Available at: https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112498.

Wang, Y. *et al.* (2024) "Flexural behaviors and failure mechanisms of CFRP sandwich structures with enhanced dual-phase lattice cores," *Composite Structures*, 328. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117724.

Wannarong, D. and Singhanart, T. (2022) "A Review of Sandwich Composite Structures with 3D Printed Honeycomb Cores," *Engineering Journal*, 26(6), pp. 27–39. Available at: https://doi.org/10.4186/ej.2022.26.6.27.

Yin, H. *et al.* (2023) "Review on lattice structures for energy absorption properties," *Composite Structures*, 304(P1), p. 116397. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116397.

Zhang, C. *et al.* (2025) "Study on Anti-Explosion Performance and Mechanism of Lattice Sandwich Panels of Ti-6Al-4V Alloy," *International Journal of Impact Engineering*, 207(July 2025), p. 105477. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105477.

Zhang, X. *et al.* (2023) "Study on the bending and shear properties of quasi-honeycomb sandwich structures considering the variable-density core design," *Composite Structures*, 324. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117517.

Zhang, Z. jia *et al.* (2025) "Superior compressive performance of a novel plate-added X-lattice core sandwich structure at elevated temperatures," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 196. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108992.

Zhao, W. *et al.* (2025) "Investigation on the ballistic impact response and energy absorption characteristics of CFRP/aluminum honeycomb sandwich panel multi-layer structures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 237. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.113084
.

Business Sales Forecasting Model Using Regularized Linear Regression and Temporal Validation

Ángel Maximiliano Arenas Muñiz * **Dante Mújica Vargas** *
Andrés Antonio Arenas Muñiz *

* *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, México*

Abstract: Sales forecasting is a key process for strategic business planning. This study develops a machine learning model for sales prediction by integrating internal and external variables. Two predictive models, Linear Regression and Ridge Regression, were compared using a dataset combining historical sales records with international WTI oil prices as an external influence. Results show an improvement in the coefficient of determination (R^2) from 0.635 to 0.714 after applying regularization, reducing overfitting and improving generalization. The incorporation of external indicators and temporal validation techniques strengthens predictive capacity and practical utility for business decision-making.

Keywords: sales forecasting; multiple linear regression; reproducible pipeline; SMEs; WTI crude; model evaluation.

1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de anticipar tendencias de ventas representa una ventaja competitiva en mercados dinámicos y altamente volátiles. En los últimos años, las empresas han incrementado el uso de técnicas de análisis predictivo para optimizar decisiones relacionadas con inventarios, producción y estrategias de marketing. No obstante, los métodos estadísticos tradicionales suelen presentar limitaciones cuando intervienen factores externos no lineales, como los precios energéticos o la variación de indicadores macroeconómicos.

El aprendizaje automático (*Machine Learning*, ML) ofrece herramientas flexibles y adaptativas para modelar relaciones complejas entre variables. A través de modelos supervisados, es posible identificar patrones de comportamiento y predecir con mayor precisión el desempeño de un negocio. Dentro de este marco, la regresión lineal constituye un punto de partida interpretativo que permite establecer relaciones causales básicas, mientras que las técnicas de regularización, como Ridge Regression, reducen la sobreajuste y mejoran la capacidad de generalización del modelo.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo predictivo de ventas empresariales que integre variables internas y externas, evaluando el impacto del precio internacional del petróleo WTI sobre el comportamiento de las ventas. Asimismo, se busca comparar el desempeño entre un modelo de Regresión Lineal y uno de Ridge Regression, aplicando validación temporal para medir la estabilidad de las predicciones. De esta manera, se pretende demostrar que la incorporación de indicadores externos y técnicas de regularización contribuyen significativamente a fortalecer la precisión del pronóstico de ventas en entornos empresariales reales.

2. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, la predicción de ventas ha recibido una atención creciente tanto desde el enfoque de modelos estadísticos clásicos como mediante la aplicación de técnicas modernas de *machine learning*. Diversos estudios comparativos han mostrado diferencias significativas en el desempeño entre la regresión lineal y modelos más avanzados, dependiendo de las condiciones de los datos, el contexto económico y la disponibilidad de variables predictoras.

Por ejemplo, *Hobor et al.* (2025) realizaron un análisis comparativo de modelos de aprendizaje automático para la predicción de ventas en el sector minorista, evaluando algoritmos basados en árboles y redes neuronales. Los resultados indicaron que LightGBM y XGBoost superaron en precisión y eficiencia computacional a arquitecturas neuronales como N-BEATS y NHITS, especialmente en escenarios con datos de ventas irregulares o múltiples categorías de productos. De manera similar, *Ganguly y Mukherjee* (2024) reportaron que un modelo de *Random Forest* optimizado alcanzó un coeficiente de determinación de aproximadamente $R^2 = 0.945$, mientras que una regresión lineal tradicional obtuvo apenas $R^2 = 0.531$. Estos hallazgos confirman que, si bien la regresión lineal puede servir como una línea base sólida, los modelos más sofisticados logran mejoras sustanciales cuando las condiciones de los datos lo permiten.

En el sector energético, *Conlon et al.* (2024) analizaron la predictibilidad del precio del crudo WTI, señalando que, aunque el mercado muestra cierto grado de previsibilidad,

los modelos estadísticos enfrentan grandes desafíos para capturar cambios abruptos y componentes no lineales. Complementariamente, *Hall et al.* (2025) revisaron los principales métodos de pronóstico de series de tiempo y concluyeron que los enfoques basados en árboles y redes recurrentes tienden a ofrecer el mejor rendimiento, aunque destacaron que el preprocesamiento, la imputación de datos faltantes y el control de valores atípicos son fases críticas que, en muchos casos, determinan el éxito del modelo más allá de su complejidad.

En conjunto, estos estudios demuestran que los modelos avanzados alcanzan alta precisión, pero requieren recursos computacionales considerables y experiencia especializada. En contraste, enfoques clásicos como la regresión lineal múltiple conservan su vigencia en escenarios con datos limitados y restricciones tecnológicas, aportando interpretabilidad y utilidad práctica en pequeñas y medianas empresas (PYMEs).

Por otro lado, la literatura reciente resalta la importancia de equilibrar la precisión del modelo con su costo computacional y facilidad de implementación. Métodos tradicionales como ARIMA, Holt-Winters o Prophet continúan siendo ampliamente utilizados debido a su simplicidad y bajo costo (Box et al., 2021; Taylor & Letham, 2018), aunque su capacidad para capturar relaciones no lineales es limitada en comparación con arquitecturas modernas como LSTM o Transformers (Lim et al., 2021).

Asimismo, se observa una tendencia hacia enfoques de *AutoML* y explicabilidad (*XAI*), que automatizan la selección de hiperparámetros y facilitan la interpretación de modelos complejos (He et al., 2023). Sin embargo, su adopción en PYMEs sigue siendo reducida debido a la necesidad de infraestructura avanzada.

En el contexto latinoamericano, *Martínez* (2024) y *García et al.* (2023) destacan que las PYMEs requieren herramientas de predicción simples, reproducibles y comprensibles, que puedan implementarse sin infraestructura costosa. Estos trabajos coinciden en que la regresión lineal múltiple representa una alternativa eficiente para entornos con limitaciones tecnológicas, donde la interpretabilidad es tan importante como la precisión.

En síntesis, la revisión de la literatura evidencia un vacío entre los modelos altamente complejos, con alto desempeño pero baja accesibilidad, y los métodos clásicos, más simples pero fácilmente implementables. Este estudio busca reducir ese vacío mediante el desarrollo de un modelo predictivo reproducible basado en regresión lineal y Ridge Regression, que combine precisión, interpretabilidad y bajo costo computacional en contextos empresariales reales.

3. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este trabajo se estructuró en cuatro fases principales: (1) preprocesamiento de datos, (2) selección de variables, (3) construcción y validación de modelos, y (4) evaluación de resultados. En la Figura 1 se presenta el diagrama general del flujo de trabajo propuesto.

3.1 Preprocesamiento de datos

El preprocesamiento constituye una etapa crítica para garantizar la calidad de la información utilizada en el entrenamiento de los modelos. Las variables numéricas fueron normalizadas para evitar que las de mayor magnitud dominaran el aprendizaje. Se aplicaron dos técnicas: la normalización *min–max* y la estandarización *z-score*, expresadas respectivamente como:

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, \tag{1}$$

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}, \tag{2}$$

donde μ es la media y σ la desviación estándar.

Los valores faltantes del precio del petróleo (WTI) fueron imputados mediante interpolación lineal:

$$x_t = \frac{x_{t-1} + x_{t+1}}{2}. \tag{3}$$

Asimismo, los valores atípicos fueron suavizados mediante transformaciones logarítmicas, aplicando:

$$x' = \log(x + 1). \tag{4}$$

Las fechas se transformaron al formato *datetime* y se descompusieron en componentes como mes y semana. Los registros con ventas iguales a cero fueron eliminados para evitar distorsiones en las métricas de evaluación.

3.2 Selección de variables

La selección de variables se realizó de manera manual, considerando la relevancia teórica y práctica de cada predictor. Se eligieron tres variables principales: ventas históricas (Y_{t-1}), número de transacciones (Tx_t), y el precio del petróleo WTI (WTI_t). Estas variables reflejan tanto la dinámica interna del negocio como la influencia de factores externos.

Este enfoque manual asegura interpretabilidad y aplicabilidad práctica, características relevantes para contextos empresariales con recursos limitados. A diferencia de métodos automáticos como *Recursive Feature Elimination* o *Principal Component Analysis* (PCA), la selección conceptual mantiene la coherencia con los objetivos de negocio.

3.3 Construcción y validación de modelos

El conjunto de datos se dividió respetando su orden cronológico, asignando el 80% inicial para entrenamiento y el 20% final para validación. Para reforzar la generalización, se aplicó validación temporal mediante la técnica *TimeSeriesSplit* de *scikit-learn*, con cinco divisiones de entrenamiento y prueba.

Se entrenaron y compararon dos modelos: una Regresión Lineal Múltiple y una *Ridge Regression*, la cual incorpora un término de penalización L_2 para reducir el sobreajuste. Matemáticamente, la función de costo de Ridge se expresa como:

$$J(\beta) = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{p} \beta_j^2, \tag{5}$$

donde λ es el parámetro de regularización que controla la magnitud de los coeficientes β_j.

Ambos modelos fueron implementados en *Python 3.10* utilizando la librería *scikit-learn*. El pseudocódigo del flujo de trabajo se muestra en el Algoritmo 1.

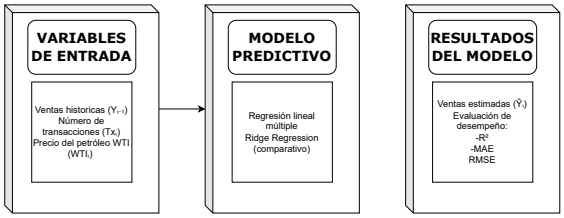


Fig. 1. Diagrama general del flujo metodológico propuesto.

Algorithm 1 Pipeline para la predicción de ventas empresariales

Entrada: Datos históricos de ventas, transacciones y WTI
Salida: Métricas de evaluación (R^2, MAE, RMSE)
(1) Cargar datos históricos desde archivo CSV.
(2) Limpiar valores nulos y aplicar normalización.
(3) Imputar valores faltantes por interpolación lineal.
(4) Eliminar registros con ventas = 0.
(5) Dividir datos (80% entrenamiento, 20% prueba) respetando temporalidad.
(6) Aplicar validación temporal (*TimeSeriesSplit*).
(7) Entrenar modelos de Regresión Lineal y Ridge Regression.
(8) Calcular métricas R^2, MAE y RMSE.
(9) Graficar predicciones vs valores reales.

3.4 Evaluación de desempeño

El rendimiento de los modelos se midió con tres métricas ampliamente utilizadas:

- **Coeficiente de determinación (R^2):** mide la proporción de varianza explicada por el modelo.
- **Error absoluto medio (MAE):** evalúa la desviación promedio entre valores predichos y reales.
- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):** penaliza los errores grandes y cuantifica la precisión global.

Estas métricas se calcularon para ambos modelos y se promediaron sobre las divisiones temporales de validación, obteniendo una comparación robusta del desempeño predictivo.

4. PROPUESTA DEL MODELO

El modelo predictivo desarrollado se fundamenta en la regresión lineal múltiple, cuyo propósito es establecer la relación entre las ventas diarias y un conjunto de variables internas y externas. Este enfoque se seleccionó por su bajo costo computacional, interpretabilidad y utilidad práctica en contextos empresariales con recursos limitados. La propuesta considera dos configuraciones complementarias: un modelo univariado, como línea base, y un modelo multivariable con regularización *Ridge*, que integra más factores explicativos y mejora la capacidad de generalización.

4.1 Modelo univariado

El primer modelo considera únicamente el precio internacional del petróleo (WTI) como predictor de las ventas. Su formulación general se expresa como:

$$\hat{Y}_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot WTI_t + \varepsilon_t, \tag{6}$$

donde $\hat{Y}_t$ son las ventas estimadas en el día t, β_0 representa el nivel base de ventas, β_1 cuantifica la variación marginal asociada al precio del crudo, y ε_t es el error no explicado por el modelo.

Este modelo sirve como referencia inicial para evaluar el impacto de la inclusión de variables adicionales y de técnicas de regularización.

4.2 Modelo multivariable con regularización Ridge

Para representar de forma más realista la dinámica del negocio, se amplió el modelo con la incorporación de ventas históricas (Y_{t-1}) y número de transacciones (Tx_t) como variables adicionales, además del precio del petróleo (WTI_t). La formulación multivariable es:

$$\hat{Y}_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot Y_{t-1} + \beta_2 \cdot Tx_t + \beta_3 \cdot WTI_t + \varepsilon_t. \tag{7}$$

Con el objetivo de reducir el sobreajuste y estabilizar las predicciones, se aplicó una penalización L_2 mediante el modelo *Ridge Regression*, cuya función de costo se define como:

$$J(\beta) = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{p} \beta_j^2, \tag{8}$$

donde λ es el parámetro de regularización que controla la magnitud de los coeficientes y evita su crecimiento excesivo.

El modelo *Ridge* se entrenó utilizando validación temporal (*TimeSeriesSplit*) con cinco divisiones, promediando las métricas de desempeño en cada iteración para evaluar la estabilidad del modelo.

4.3 Supuestos del modelo

Ambos modelos se estimaron bajo los supuestos clásicos de la regresión lineal:

- Linealidad en los parámetros.
- Independencia de los errores.
- Homocedasticidad (varianza constante de los errores).
- Media cero del término de error ε_t.

El cumplimiento de estos supuestos se verificó mediante el análisis de residuos y la inspección visual de dispersión. La adición de la regularización L_2 en el modelo *Ridge* contribuyó a mitigar posibles violaciones leves de homocedasticidad.

4.4 Limitaciones

El modelo propuesto mantiene un equilibrio entre precisión y simplicidad. Sin embargo, su desempeño puede verse afectado por la falta de variables adicionales como estacionalidad, promociones o indicadores macroeconómicos específicos. Estas limitaciones abren la posibilidad de incorporar modelos híbridos o enfoques de *AutoML* en trabajos futuros.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La validación empírica del modelo se llevó a cabo utilizando la estrategia de validación temporal descrita en la Sección 3. En cada división del *TimeSeriesSplit*, se entrenaron los modelos de Regresión lineal múltiple y *Ridge Regression* sobre el subconjunto de entrenamiento y se evaluaron sobre el subconjunto de prueba correspondiente. Las métricas se promediaron para obtener un desempeño representativo y reducir la influencia de particiones particulares.

La Tabla 1 resume los resultados promedio obtenidos para ambos modelos, considerando datos normalizados.

Table 1. Métricas de desempeño promedio para los modelos de Regresión lineal y Ridge Regression.

Modelo	**R^2**	**MAE**	**RMSE**
Regresión lineal	0.635	0.018	0.024
Ridge Regression	0.714	0.015	0.021

Los resultados muestran que el modelo de Ridge Regression supera al modelo de Regresión lineal en las tres métricas consideradas. El coeficiente de determinación R^2 se incrementa de 0.635 a 0.714, lo que representa una mejora en la proporción de varianza explicada por el modelo. De forma complementaria, el MAE y el RMSE se reducen aproximadamente un 16% y 12%, respectivamente, indicando predicciones más cercanas a los valores reales y una menor presencia de errores grandes.

Para ilustrar el comportamiento temporal de las predicciones, en la Figura 2 se muestra una comparación esquemática entre las ventas reales y las ventas estimadas por el modelo de Ridge Regression en el periodo de prueba.

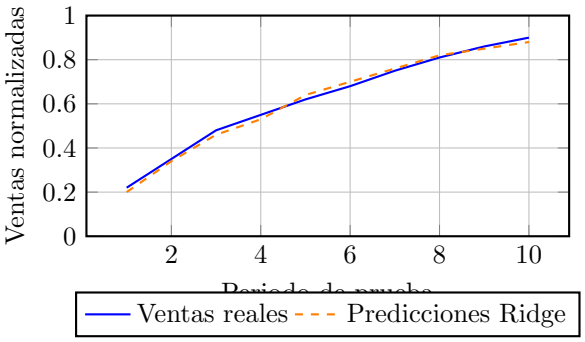


Fig. 2. Comparación entre ventas reales y predichas con el modelo Ridge Regression en el periodo de prueba.

La Figura 2 muestra que las predicciones del modelo siguen de manera cercana la tendencia observada en las ventas reales, con discrepancias moderadas en los puntos de mayor variabilidad. Este comportamiento respalda la utilidad del modelo regularizado para tareas de pronóstico en horizontes de corto y mediano plazo.

Además del desempeño global, resulta relevante analizar la contribución relativa de cada variable explicativa. La Figura 3 presenta una estimación de la importancia normalizada de las variables en el modelo Ridge Regression, a partir de los coeficientes ajustados.

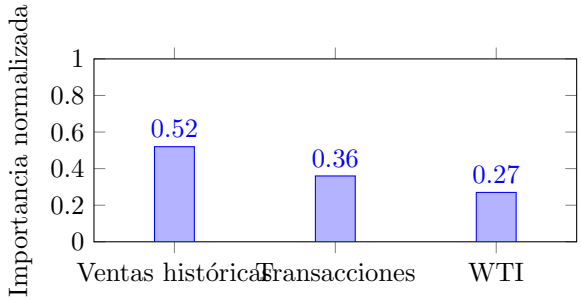


Fig. 3. Importancia relativa de las variables en el modelo Ridge Regression.

Como puede observarse, las ventas históricas presentan la mayor importancia relativa, lo que confirma la presencia de inercia temporal en la demanda. El número de transacciones también aporta información relevante al capturar la intensidad de la actividad comercial, mientras que el precio del petróleo WTI contribuye como factor externo que afecta los costos logísticos y el poder adquisitivo.

En conjunto, estos resultados indican que la combinación de variables internas y externas, junto con la regularización L_2, permite construir un modelo predictivo robusto y explicable. Este tipo de enfoque resulta especialmente valioso para pequeñas y medianas empresas que requieren herramientas de pronóstico confiables, de bajo costo computacional y con una interpretación clara para la toma de decisiones.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo demostró la viabilidad de aplicar modelos de regresión lineal múltiple y *Ridge Regression* para la predicción de ventas en contextos empresariales con recursos computacionales limitados. A través de un proceso metodológico estructurado —que incluyó preprocesamiento de datos, selección de variables, validación temporal y comparación de modelos— se desarrolló un sistema predictivo reproducible, interpretable y de bajo costo de implementación.

Los resultados experimentales confirmaron que la incorporación de regularización L_2 mediante el modelo *Ridge Regression* mejora la precisión del pronóstico respecto al modelo lineal tradicional, incrementando el coeficiente de determinación (R^2) y reduciendo los errores promedio (MAE y RMSE). Esto evidencia que el uso de técnicas de regularización contribuye a una mejor generalización y estabilidad del modelo, incluso en entornos con variabilidad moderada en los datos.

Desde una perspectiva práctica, el modelo propuesto constituye una herramienta útil para la planeación de inventarios, proyección de demanda y apoyo a la toma de decisiones en pequeñas y medianas empresas. Su implementación en Python, junto con el uso de bibliotecas abiertas, lo hace accesible y fácilmente integrable en sistemas de análisis empresarial.

Como trabajo futuro, se plantea ampliar la base de datos con variables que capturen estacionalidad, promociones y factores macroeconómicos, así como explorar modelos híbridos que combinen *Machine Learning* tradicional con enfoques de *AutoML* o redes neuronales ligeras. De igual manera, se propone desarrollar una interfaz interactiva que permita automatizar la carga de datos y la visualización de resultados, con el fin de facilitar la adopción del modelo en entornos empresariales reales.

REFERENCES

[1] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (2021). *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (6th ed.). Wiley, Hoboken.

[2] Chen, L., Wang, J., & Li, H. (2022). Hybrid models for crude oil price forecasting: Combining TCN and LightGBM. *Applied Energy*, 312, 118750.

[3] Conlon, T., Cotter, J., & McGee, R. (2024). Forecasting the price of oil: A cautionary note. *Energy Economics*, 121, 106768.

[4] Ganguly, A., & Mukherjee, S. (2024). Enhancing retail sales forecasting with optimized machine learning models. *Journal of Business Analytics*, 7(2), 145–162.

[5] García, R., López, M., & Hernández, J. (2023). Machine learning y analítica de datos en la gestión empresarial. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Industrial*, 14(2), 88–102.

[6] Hall, J., Ramirez, F., & Zhou, K. (2025). A survey of machine learning methods for time series forecasting. *Expert Systems with Applications*, 238, 121556.

[7] He, J., Chen, Z., & Xu, X. (2023). Explainable AutoML frameworks for small-scale business analytics. *Journal of Intelligent Information Systems*, 61(3), 551–570.

[8] Hobor, M., Brcic, D., Polutnik, M., & Kapetanovic, S. (2025). Comparative analysis of modern machine learning models for retail sales forecasting. *Procedia Computer Science*, 232, 1109–1118.

[9] Kumar, S. (2022). Data-driven management and predictive analytics in retail operations. *Journal of Retail Analytics*, 5(1), 23–39.

[10] Lim, B., Arik, S. O., Loeff, N., & Pfister, T. (2021). Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 37(4), 1748–1764.

[11] Martínez, P. (2024). Aplicación de regresión lineal múltiple en el análisis de ventas minoristas. *Revista Iberoamericana de Ciencia de Datos*, 10(1), 55–68.

[12] Porter, M. (2021). Estrategia competitiva en entornos dinámicos. *Harvard Business Review*, 99(4), 77–85.

[13] Taylor, S. J., & Letham, B. (2018). Forecasting at scale with Prophet. *The American Statistician*, 72(1), 37–45.

[14] Zhang, Y. (2021). Machine learning approaches for sales prediction: A review. *International Journal of Data Science*, 6(3), 201–220.

Thermal and Energy Performance Evaluation of a Recycled Polypropylene Horizontal Extruder

Rincon-Quintero, Arly Dario 1 *, Sandoval-Rodriguez, Camilo Leonardo 2 *, Lengerke, Omar 3 *, Rincon-Quintero, Dairo Alejandro **, Rincon-Quintero, Abel ***

** Unidades Tecnológicas de Santander, 680005.*
(e-mail: {arincon, csandoval, olengerke}@correo.uts.edu.co).

*** Fundación de Educación Superior San José, 111071.*
(e-mail: darincon@sanjose.edu.co).

** Universidad a Distancia de Madrid UDIMA, 28400.*
(e-mail: abel.rincon@udima.es).

Abstract: This research evaluates the productivity of a horizontal screw extruder designed for the manufacturing of Lego-type bricks using recycled polypropylene (PP). The study focuses on analyzing the thermal and energy performance of the extrusion process to improve operational efficiency and ensure the quality of the final product. A quantitative and experimental methodology was applied, involving the characterization of the recycled material, the modeling of the extruder components, and the assessment of the process under controlled temperature and speed conditions.
Thermal calculations were performed to determine the heat distribution along the screw and its effect on the melting homogeneity of the polypropylene. Simultaneously, the energy consumption of the extruder was monitored to establish the relationship between productivity, energy demand, and operating costs. The obtained results reveal that optimizing the thermal profile and screw rotation speed can significantly enhance production rates while reducing energy losses.
This work demonstrates the technical feasibility of reusing recycled polypropylene in construction applications through extrusion, contributing to the development of sustainable manufacturing technologies. The findings provide valuable insights for improving the design and control of small-scale extrusion systems, promoting circular economy practices in the plastics industry. Overall, the study highlights how energy-efficient extrusion can serve as a viable alternative for transforming plastic waste into functional, eco-friendly construction materials.

Keywords: Recycled Polypropylene, Extrusion, Energy Efficiency, Productivity, Sustainable Manufacturing

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el incremento en la generación de residuos plásticos y la limitada capacidad de reciclaje en países en desarrollo han representado un desafío ambiental de gran magnitud. Por ello, se hace necesario impulsar estrategias que promuevan la reducción del impacto ambiental y el aprovechamiento eficiente de los materiales posconsumo (Ahmed *et al.*, 2025). En este sentido, en Colombia solo cerca del 17% de los plásticos generados se reciclan, lo que evidencia la urgencia de desarrollar soluciones tecnológicas sostenibles que fomenten la economía circular (Ishfaq *et al.*, 2025). De esta manera, el polipropileno reciclado (PP) se presenta como un material de alto potencial para la fabricación de elementos constructivos, ya que combina durabilidad, resistencia química y facilidad de procesamiento (Arslan *et al.*, 2025).

Por otra parte, la extrusión de plásticos reciclados constituye un proceso clave dentro de la cadena de transformación de materiales, debido a que permite obtener productos con geometrías específicas y propiedades controladas (Bortoletto *et al.*, 2025). Sin embargo, el desempeño de las extrusoras depende de factores térmicos, mecánicos y energéticos que determinan su productividad y la calidad del producto final (Ahmadi *et al.*, 2025). En consecuencia, el análisis de estos parámetros resulta fundamental para optimizar la eficiencia operativa, mejorar el rendimiento del proceso y reducir el impacto ambiental asociado al consumo energético (Rojas González *et al.*, 2025).

En este contexto, el presente trabajo evalúa la productividad de una extrusora con tornillo horizontal destinada a la fabricación de ladrillos tipo “Lego” a partir de polipropileno reciclado, mediante cálculos térmicos y análisis del consumo energético (Namnidi, van Breemen and Looijmans, 2025). Así, la investigación se enmarca en el desarrollo de tecnologías de bajo costo orientadas a la valorización de residuos plásticos y su aplicación en el sector de la construcción sostenible. Cabe

resaltar que, el enfoque metodológico integra criterios de eficiencia térmica, desempeño energético y aprovechamiento de materiales reciclados, lo que contribuye a la consolidación de procesos industriales más responsables (Soenen *et al.*, 2025).

Finalmente, los resultados obtenidos aportan criterios técnicos para mejorar el desempeño de los equipos de extrusión y promover el uso de materiales reciclados como alternativa viable frente a los insumos convencionales (Görbe, Széplaki and Bárány, 2025). En conclusión, esta investigación representa un avance significativo hacia la implementación de sistemas productivos más eficientes, sostenibles y alineados con los principios de la economía circular en la industria del plástico reciclado (Mekideche *et al.*, 2025)(Leherbauer *et al.*, 2025).

2. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se estructura bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y experimental, con el propósito de evaluar la productividad y el rendimiento energético de una extrusora de tornillo horizontal utilizada en la fabricación de ladrillos tipo "Lego" a partir de polipropileno reciclado (PP). Adicionalmente, la metodología se divide en tres etapas principales: modelamiento del sistema de extrusión, pruebas experimentales y evaluación de la productividad (Bandinelli *et al.*, 2025).

2.1 Modelamiento del sistema de extrusión

En la primera etapa se realiza el modelamiento mecánico y eléctrico de los componentes de la extrusora, empleando el software SOLIDWORKS para simular las condiciones geométricas y operativas del sistema (Figura 1). El diseño incluye la tolva de alimentación, el cañón, el tornillo sin fin, las resistencias de calefacción y el motoreductor, donde este modelamiento permite garantizar la precisión dimensional, una adecuada distribución térmica y un flujo homogéneo del polímero durante la extrusión (Petousis *et al.*, 2025).

El material seleccionado es el polipropileno reciclado (PP), debido a su baja densidad (0,90 g/cm³) y su temperatura de fusión de aproximadamente 173°C, lo que permite un procesamiento eficiente y estable (Xiahou *et al.*, 2025), (ver propiedades en la Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades de polímeros comunes

Tipos de plástico	Densidad (g/cm³)	Temperatura de fusión (°C)
PET	1.38	260
HDPE	0.96	132
PVC	1.56	212
LDPE	0.92	110
PP	0.90	173
PS	1.05	217

Figura 1. Modelado en Software SolidWorks

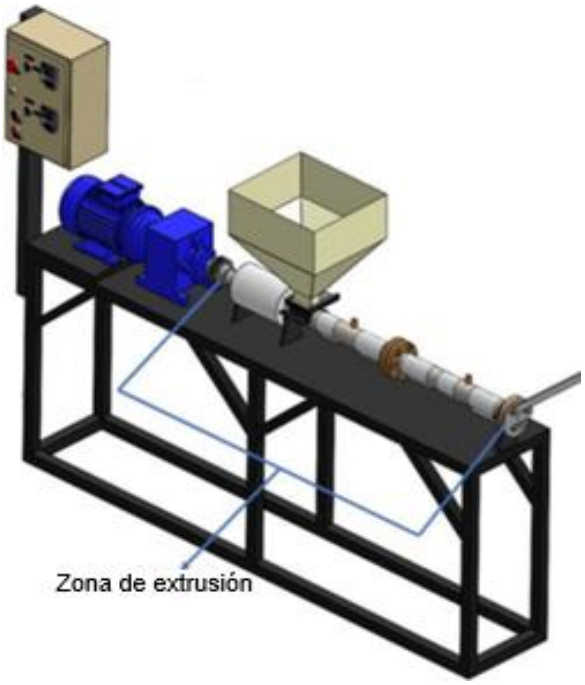
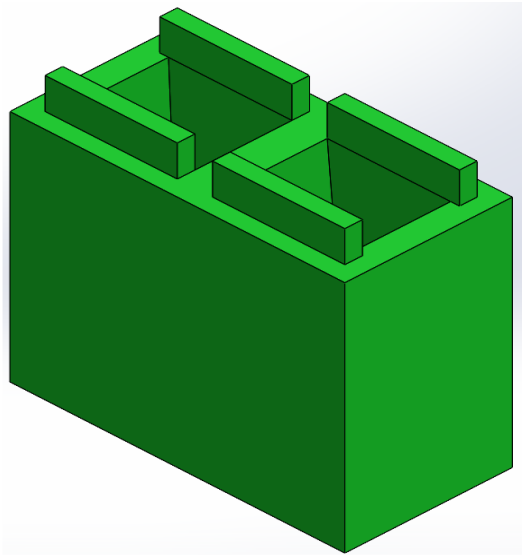


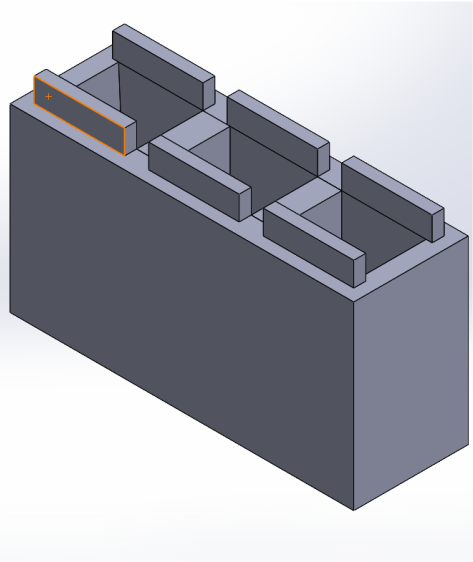
Figura 2. Bloque tipo A



Asimismo, se diseñan dos tipos de bloques: Tipo A y Tipo B, con longitudes de 0,285 m y 0,190 m respectivamente, con el fin de lograr un sistema modular que facilite el ensamblaje estructural (Ver Figuras 2 y 3). Estos modelos son pensados para simular muros de 4 metros de largo y 3 metros de alto, asegurando compatibilidad dimensional en la construcción de prototipos.

Además, se registró que la primera zona presenta una rápida estabilización térmica, mientras que las zonas intermedias y finales requieren un control más preciso para evitar pérdidas de calor. Esta información permite establecer un perfil térmico ideal que minimiza las variaciones de viscosidad del polímero y mejora la consistencia del flujo.

Figura 3. Bloque tipo B



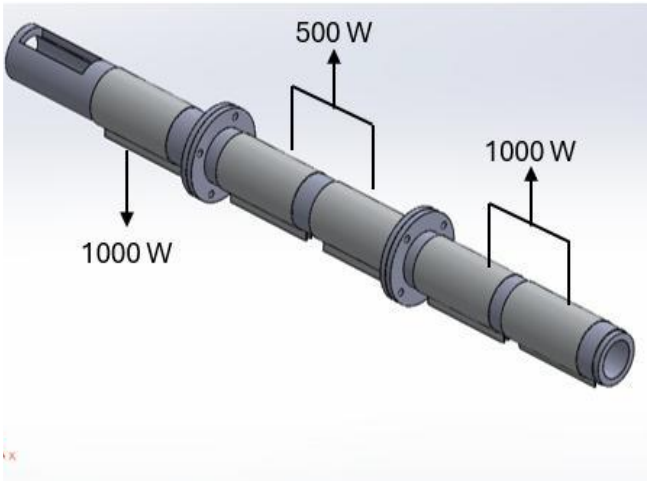
2.2 Procedimiento experimental

Las pruebas experimentales se llevan a cabo en el Laboratorio de Térmicas de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) en la ciudad de Bucaramanga, Colombia. El proceso consiste en la alimentación del material triturado, el calentamiento de las zonas del cañón, la extrusión del polímero y el enfriamiento del producto final. Las variables medidas son:

- Velocidad de rotación del tornillo (rpm)
- Temperatura en cada zona de calentamiento (°C)
- Consumo energético total (kWh)
- Tasa de producción (kg/h)

El control térmico se realiza mediante resistencias distribuidas a lo largo del cañón, diseñadas de acuerdo con el perfil de fusión del polipropileno reciclado (Figura 4). Las zonas de calentamiento se monitorean para evaluar la homogeneidad del proceso térmico, donde la zona 1 corresponde a la primera resistencia de 1000 w, la zona 2 corresponde a la resistencia de 500 w y la zona 3 es la otra resistencia de 1000 w.

Figura 4. Ubicación de resistencias térmicas



Durante la experimentación, se registran los consumos eléctricos del sistema de calefacción y del motorreductor mediante un analizador de potencia, con el fin de establecer la relación entre energía utilizada y masa de material procesado (Ullah and Ali, 2025). Los datos de consumo durante la fase de precalentamiento se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de consumo en prueba de precalentamiento

Datos de consumo prueba de precalentamiento			
Consumo Zona 1 (kWh)	Consumo Zona 2 (kWh)	Consumo Zona 3 (kWh)	Consumo Total (kWh)
0.206	0.206	0.245	0.658
0.413	0.413	0.491	1.316
0.619	0.619	0.736	1.974
0.825	0.825	0.982	1.974
1.031	1.031	1.227	2.632
1.238	1.238	1.473	3.948
1.403	1.403	1.669	4.474

2.3 Evaluación de la productividad

La productividad se determina a partir de la relación entre la masa de material extruido (kg) y el tiempo efectivo de operación (h). Con estos datos, se calcula el consumo energético específico (kWh/kg) para los modelos de ladrillos tipo A y tipo B. (Tabla 3).

Tabla 3. Datos consumo ladrillos

	Consumo total (kWh)	Consumo producción (kWh)	Consumo primer bloque (kWh)	Tarifa eléctrica ($/kWh)	Productividad (kg/h)
A	22.66	18.19	6.877	696.34	11.29
B	25.05	20.57	7.192	696.34	11.29

Posteriormente, se estima el costo energético por unidad de producto, con el propósito de analizar la viabilidad económica del proceso. Los resultados experimentales fueron comparados entre sí para identificar la combinación óptima de temperatura, velocidad de tornillo y consumo eléctrico, buscando maximizar la eficiencia y minimizar las pérdidas energéticas.

Finalmente, se establecen criterios de mejora para el diseño de sistemas de extrusión de bajo costo que permitan un aprovechamiento más eficiente de materiales reciclados, aportando al desarrollo de tecnologías sostenibles dentro de la industria plástica (Arjona *et al.*, 2026).

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

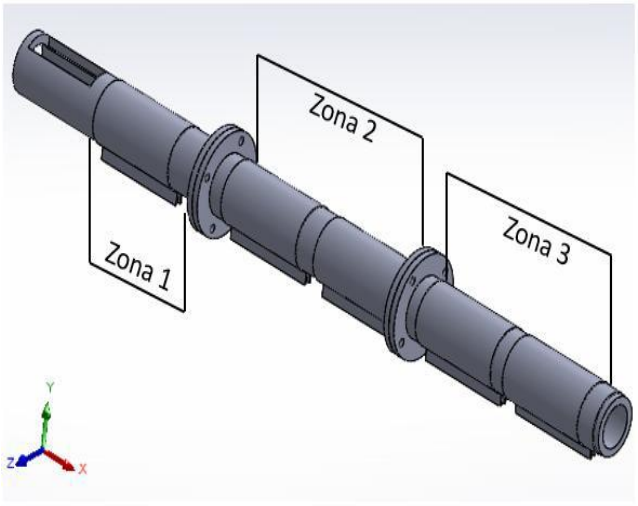
Los resultados obtenidos en la evaluación experimental de la extrusora con tornillo horizontal permitieron analizar el comportamiento térmico, el consumo energético y la

productividad del sistema durante la fabricación de ladrillos tipo "Lego" en polipropileno reciclado (PP). En primer lugar, se verificó que la distribución de temperatura a lo largo del cañón influyó directamente en la homogeneidad del material fundido y en la estabilidad del flujo de extrusión (Blanco *et al.*, 2025).

3.1 Comportamiento térmico del proceso

Durante las pruebas de precalentamiento y extrusión, se observaron diferencias significativas entre las tres zonas de calentamiento. En consecuencia, se identificó un equilibrio térmico óptimo a una temperatura promedio de 175 ± 5 °C, la cual permitió una fusión homogénea del polipropileno sin degradación del material.

Figura 5. Zonas de calentamiento



Además, se registró que la primera zona presenta una rápida estabilización térmica, mientras que las zonas intermedias y finales requieren un control más preciso para evitar pérdidas de calor. Esta información permite establecer un perfil térmico ideal que minimiza las variaciones de viscosidad del polímero y mejora la consistencia del flujo.

Estos resultados concuerdan con estudios recientes de Bortoletto y otros (Bortoletto *et al.*, 2025) que destacan la importancia de la gestión térmica en la eficiencia de los procesos de extrusión de polímeros reciclados.

3.2 Evaluación del consumo energético

El análisis detallado del consumo energético de la extrusora permitió identificar los factores que más influyen en la demanda total de potencia durante el proceso de fabricación de los bloques tipo "Lego" en polipropileno reciclado (PP). En primera instancia, se confirmó que el consumo se encuentra estrechamente relacionado con el comportamiento térmico del cañón, ya que el sistema requiere alcanzar y mantener un perfil de temperatura uniforme para garantizar la correcta fusión del polímero. Durante esta fase, las resistencias eléctricas representan la mayor proporción del gasto energético, acumulando cerca del 78% del total registrado, mientras que el motorreductor aporta aproximadamente el 22% restante. Esta distribución evidencia que las mejoras relacionadas con el aislamiento térmico y la eficiencia de calentamiento podrían generar reducciones significativas en el consumo global.

Asimismo, los datos experimentales mostraron que el consumo energético específico varió entre 1,24 kWh/kg y 1,32 kWh/kg, valores coherentes con el comportamiento esperado en sistemas de extrusión de pequeña escala. Estas cifras reflejan que, pese a tratarse de un equipo no industrial y construido con componentes de bajo costo, su eficiencia energética se mantiene dentro de parámetros aceptables para aplicaciones basadas en materiales reciclados. Dichos niveles de consumo dependen, además, del tiempo requerido para el precalentamiento, pues en esta fase se concentran los picos iniciales de demanda, cuando las resistencias trabajan a su máxima capacidad para llevar el sistema a la temperatura objetivo.

Otro aspecto relevante observado es la influencia de la velocidad de rotación del tornillo en la demanda energética. A medida que se incrementa la velocidad de giro, el motorreductor requiere una mayor potencia para vencer la resistencia del material parcialmente fundido dentro del cañón. Este incremento de torque produce una elevación moderada del consumo eléctrico; sin embargo, también puede aumentar la productividad, lo que abre la posibilidad de encontrar un punto óptimo donde la relación entre energía consumida y masa extruida resulte más favorable. Este balance es clave para la eficiencia del proceso y constituye un parámetro de ajuste fundamental para futuras optimizaciones.

Por otro lado, la estabilidad térmica desempeña un papel determinante en la eficiencia energética. Cuando el sistema presenta fluctuaciones de temperatura en alguna de las tres zonas del cañón, las resistencias deben activarse con mayor frecuencia para corregir dichas variaciones, lo cual incrementa el consumo total. En cambio, un perfil térmico bien regulado reduce significativamente los ciclos de encendido y apagado de las resistencias, promoviendo un uso más eficiente de la energía disponible. Esto sugiere que la incorporación de sensores adicionales y sistemas de control más precisos podría mejorar la eficiencia térmica y, por ende, disminuir el gasto energético asociado.

Además, la energía consumida durante la preparación de los moldes, los tiempos de purga y la manipulación del material también impacta el balance energético general del proceso. Aunque estas contribuciones no fueron cuantificadas de forma independiente, su influencia se refleja en el consumo total registrado para los bloques tipo A y B. De hecho, las diferencias entre ambos tipos de bloques, aunque pequeñas, pueden atribuirse al volumen de material manejado y al tiempo efectivo de extrusión, mostrando que las características geométricas del producto final tienen un efecto directo sobre la eficiencia energética del sistema.

El análisis de consumo energético demuestra que el equipo evaluado posee un comportamiento competitivo frente a extrusoras de escala piloto reportadas en la literatura, lo cual valida su diseño y desempeño. A pesar de ser una extrusora construida con fines académicos y experimentales, logra mantener consumos específicos razonables y un uso estable de la energía a lo largo del proceso. Estos resultados evidencian

que, mediante ajustes en el aislamiento térmico, la automatización del control de temperatura y la optimización de la velocidad del tornillo, es posible mejorar aún más el rendimiento energético del sistema y avanzar hacia una operación más eficiente y sostenible.

3.3 Productividad del sistema

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales permitieron realizar un análisis profundo del desempeño productivo de la extrusora, evidenciando cómo los parámetros operativos influyen en la cantidad de material extruido por unidad de tiempo. La productividad promedio registrada, con valores entre 2,8 kg/h para los bloques tipo B y 3,2 kg/h para los bloques tipo A, muestra una concordancia directa con las características geométricas del tornillo y la capacidad del motorreductor empleado. Estos valores se consideran adecuados para un sistema de extrusión de pequeña escala, cuyo propósito principal es transformar material reciclado en elementos modulares para aplicaciones constructivas.

Sin embargo, se observó que pequeñas variaciones en la velocidad de rotación del tornillo pueden generar cambios considerables en la tasa de producción. Por ejemplo, un incremento de aproximadamente 10 rpm produjo un aumento cercano al 12 % en la masa extruida por hora, lo que evidencia la sensibilidad del proceso frente a las condiciones de operación. Esto abre la posibilidad de optimizar la productividad ajustando finamente la velocidad de giro, siempre considerando las limitantes térmicas y de homogeneidad del material fundido.

Por otro lado, la productividad también estuvo relacionada con el perfil térmico aplicado en las zonas del cañón, ya que temperaturas insuficientes generaron mayor resistencia al flujo y, por ende, una reducción en la tasa de salida del polímero. De igual forma, temperaturas excesivas condujeron a una disminución de la viscosidad, lo cual, aunque mejora la fluidez, incrementa el riesgo de degradación térmica del material. Por tanto, la productividad óptima depende del equilibrio entre fluidez, estabilidad térmica y velocidad de tornillo.

Además, el proceso mostró que la geometría de los bloques fabricados influye en la productividad final, siendo más eficiente la producción de bloques de mayor volumen (tipo A) debido a la menor cantidad de cambios de molde y a la estabilidad que ofrece un flujo de extrusión continuo. Esto aporta un criterio relevante para la planificación de procesos industriales que utilicen polímeros reciclados: el diseño del producto final puede condicionar significativamente el rendimiento global del sistema.

La productividad observada demuestra que el equipo desarrollado es capaz de mantener una operación estable y repetible, lo cual es crucial en líneas de producción basadas en materiales reciclados, cuyos parámetros pueden ser más variables que los de polímeros vírgenes. La consistencia lograda en el desempeño productivo refleja que el diseño mecánico y térmico de la extrusora es adecuado y que existen oportunidades claras para mejorar aún más mediante estrategias de automatización y control (Ahmed *et al.*, 2025).

3.4 Discusión general

El análisis integral del proceso evidenció que la extrusora diseñada ofrece un rendimiento adecuado tanto en términos térmicos como energéticos y productivos, demostrando la viabilidad del uso de polipropileno reciclado en aplicaciones constructivas. Uno de los aspectos más relevantes identificados es la relación entre la estabilidad térmica y la calidad del flujo de extrusión. El control preciso de las zonas de calentamiento permitió mantener la viscosidad del material dentro de rangos óptimos, condición indispensable para asegurar una extrusión uniforme, sin oscilaciones ni defectos en la superficie del producto final.

La gestión eficiente de la energía fue otro punto clave en esta discusión. El hecho de que cerca del 78 % de la energía consumida corresponda a las resistencias de calefacción indica que futuras mejoras deben orientarse hacia el aislamiento térmico del cañón y la implementación de estrategias de control inteligente, como módulos de regulación basados en aprendizaje automático o sistemas de calentamiento alternativos más eficientes. Asimismo, el consumo específico registrado (entre 1,24 y 1,32 kWh/kg) se encuentra dentro de los rangos reportados por extrusoras piloto en estudios recientes, lo cual valida la efectividad del diseño implementado.

Desde una perspectiva estructural y operativa, el equipo demostró que es posible procesar polipropileno reciclado sin comprometer su integridad térmica. Esto es especialmente relevante, ya que los materiales reciclados tienden a presentar variabilidad en su composición, en su degradación previa y en su capacidad de fundido. A pesar de ello, el sistema mantuvo un comportamiento estable, lo que demuestra que el diseño del tornillo, la distribución térmica y el control del motorreductor son adecuados para compensar las posibles fluctuaciones del material de alimentación.

Por otra parte, el análisis comparativo entre los bloques tipo A y tipo B permitió identificar elementos importantes para la optimización del proceso. Aunque ambos modelos presentaron niveles de productividad similares, las diferencias de volumen y geometría influyeron en la cantidad total de energía requerida para completar cada ciclo, lo cual abre la posibilidad de realizar estudios adicionales sobre el impacto del diseño del producto en el rendimiento energético y el costo de fabricación.

En términos ambientales y de sostenibilidad, este estudio refuerza la idea de que la extrusión de materiales reciclados constituye una alternativa viable y altamente replicable para reducir la generación de residuos plásticos. La posibilidad de fabricar elementos constructivos funcionales a partir de polímeros posconsumo contribuye directamente a la economía circular, fomentando la revalorización de materiales que tradicionalmente se descartarían.

Los hallazgos obtenidos permiten proyectar mejoras futuras basadas en el control y optimización del proceso, proponiendo una plataforma sólida para investigaciones posteriores que busquen aumentar la eficiencia, la estabilidad operativa y la calidad de los productos extruidos. En conjunto, la discusión

general demuestra que la extrusora desarrollada no solo es funcional, sino también escalable y susceptible de mejoras que pueden elevar su competitividad en aplicaciones industriales de mayor envergadura.

4. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo experimental y el análisis de la productividad de la extrusora con tornillo horizontal para la fabricación de ladrillos tipo "Lego" en polipropileno reciclado, se pueden establecer las siguientes conclusiones principales:

Primero, se comprobó que el polipropileno reciclado (PP) es un material viable para procesos de extrusión aplicados a la fabricación de elementos constructivos. Su comportamiento térmico permitió una fusión uniforme sin degradación del material, garantizando la estabilidad del flujo y la calidad del producto final.

En segundo lugar, el sistema de calefacción dividido por zonas resultó fundamental para alcanzar una temperatura promedio de 175 ± 5 °C, optimizando la transferencia de calor a lo largo del cañón. Este control térmico permitió mejorar la homogeneidad del polímero fundido y reducir los tiempos de estabilización del proceso.

Asimismo, el análisis energético evidenció que la mayor demanda de potencia se concentró en las resistencias eléctricas, representando cerca del 78 % del consumo total. No obstante, el balance global del sistema mostró un desempeño eficiente, con consumos específicos entre 1,24 y 1,32 kWh/kg, valores competitivos frente a sistemas de extrusión industriales.

Por otro lado, la productividad promedio alcanzada (entre 2,8 y 3,2 kg/h) demostró que el diseño y dimensionamiento del equipo son adecuados para operaciones de pequeña escala, ofreciendo una alternativa técnica viable y de bajo costo para la transformación de plásticos reciclados.

Además, los resultados obtenidos confirman que la extrusión de materiales reciclados puede ser optimizada mediante ajustes de velocidad de tornillo, perfil térmico y aislamiento del sistema, lo cual contribuye directamente a la eficiencia energética y a la reducción de pérdidas por disipación.

Finalmente, este estudio aporta una base técnica sólida para el diseño y operación de extrusoras orientadas al aprovechamiento de residuos plásticos en la industria de la construcción. De este modo, la investigación contribuye al fortalecimiento de prácticas sostenibles y al impulso de la economía circular, promoviendo la generación de materiales ecológicos, modulares y funcionales a partir de polímeros reciclados.

4.1 Proyecciones futuras

A futuro, se propone continuar con la automatización del control térmico mediante la integración de controladores PID avanzados y sensores distribuidos que permitan monitorear en tiempo real la temperatura, el torque y la presión del polímero durante la extrusión. Esto facilitará el desarrollo de modelos predictivos basados en técnicas de aprendizaje automático, capaces de ajustar de manera autónoma los parámetros operativos para maximizar la eficiencia energética y la estabilidad del flujo.

Asimismo, se plantea incorporar sistemas de aislamiento térmico mejorados en el cañón y las zonas de calentamiento, con el propósito de reducir pérdidas de energía y aumentar el rendimiento global del proceso. Otra línea de trabajo relevante consiste en la evaluación de distintas geometrías de tornillos y perfiles de compresión, con el fin de optimizar la homogeneidad de la mezcla y mejorar la velocidad de producción sin incrementar el consumo energético.

De igual manera, se proyecta ampliar el estudio hacia la caracterización mecánica, térmica y estructural de los ladrillos obtenidos, evaluando su comportamiento en aplicaciones reales de construcción y comparándolos con materiales convencionales. También se considera realizar pruebas de durabilidad, resistencia al impacto y comportamiento frente a diferentes condiciones ambientales.

Finalmente, se prevé explorar la incorporación de aditivos sostenibles o fibras recicladas que permitan mejorar las propiedades mecánicas de los bloques, así como el diseño de nuevos moldes modulares que amplíen las posibilidades constructivas del sistema. Estas proyecciones permitirán consolidar una tecnología de extrusión más eficiente, automatizada y adaptable, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles dentro de la industria de transformación de plásticos reciclados.

REFERENCIAS

Ahmadi, M. *et al.* (2025) 'Engineering flame and mechanical properties of natural plant-based fibre biocomposites', *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 8(2), pp. 168–195. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2024.08.002.

Ahmed, A.A. *et al.* (2025) 'Recent progress on recycling and upcycling of PET plastic waste into high-value-added materials for versatile applications', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3), p. 116678. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116678.

Arjona, P. *et al.* (2026) 'Simulated secondary mechanical recycling of PLA water bottles: insights into structural integrity, barrier performance, and biodegradability', *Resources, Conservation and Recycling*, 225, p. 108597. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108597.

Arslan, D. *et al.* (2025) 'Formulation and characterization of polyetherimide composites reinforced with recycled carbon fibers and thermal black particles for fused filament fabrication', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 194, p. 108946. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108946.

Bandinelli, F. *et al.* (2025) 'Recycling a carbon fiber-reinforced polyamide through 3D printing: A mechanical and physicochemical analysis', *Composites Part B: Engineering*, 294, p. 112147. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112147.

Blanco, A. *et al.* (2025) 'Advancing polypropylene quantification in recycled HDPE: A comparative study of FTIR, DSC, TREF, and

TGIC for enhanced plastic circularity', *Polymer Testing*, 149, p. 108855. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108855 .

Bortoletto, A. *et al.* (2025) 'Silver streaks dependence on processing conditions in the injection molding of post-consumer recycled polypropylene', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 63, pp. 1–11. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2025.09.005.

Görbe, Á., Széplaki, P. and Bárány, T. (2025) 'Ultrasonic welding of ground tire rubber-filled polypropylene blends', *Results in Engineering*, 25, p. 104588. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104588.

Ishfaq, K. *et al.* (2025) 'Understanding the circular economy and mechanical performance of additively manufactured recycled PET for sustainable process optimization', *Rapid Prototyping Journal*, 31(7), pp. 1393–1411. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2024-0265.

Leherbauer, D. *et al.* (2025) 'Model-based Electricity Consumption Quantification of Polymer Extruders for Mechanical Recycling Applications', *Procedia CIRP*, 135, pp. 630–635. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.01.072.

Mekideche, S. *et al.* (2025) 'Manufacture and characterization of lightweight sand-plastic composites made of plastic waste and sand: Effect of sand types', *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 8(1), pp. 53–65. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.08.004.

Namnidi, S.D., van Breemen, L.C.A. and Looijmans, S.F.S.P. (2025) 'Structure-property relations in PP/HDPE blends: From processing to performance', *Polymer*, 323, p. 128150. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128150.

Petousis, M. *et al.* (2025) 'Sustainability driven additive manufacturing: repetitive mechanical recycling response evaluation to valorize polycarbonate scrap††Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: https://doi.org/10.1039/d5va00048c', *Environmental Science Advances*, 4(8), pp. 1279–1298. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d5va00048c.

Rojas González, L.M. *et al.* (2025) 'Bioinspired polypropylene-based functionally graded materials and metamaterials modeling the mistletoe–host interface', *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 16, pp. 1592–1606. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.3762/bjnano.16.113.

Soenen, W. *et al.* (2025) 'Reactive extrusion of vitrimers: A short review', *Sustainable Materials and Technologies*, 45, p. e01638. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01638.

Ullah, S. and Ali, M. (2025) 'Development and properties investigation of recycled plastic solid interlocking blocks', *Case Studies in Construction Materials*, 23, p. e05342. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05342.

Xiahou, X. *et al.* (2025) 'From waste to strength: Sustainable valorization of modified recycled PET fibers for rheological control and performance enhancement in 3D printed concrete', *Case Studies in Construction Materials*, 23, p. e05144. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05144.

From Outsourcing to Cooperative Industrial Systems: Bayesian Modeling and Monte Carlo Simulation for Sustainable Production Networks

Espinoza Huerta Tlaloc Daniel* y De la Torre Gea Guillermo**

**Instituto Tecnológico de San Juan del Río, A. Tecnológico # 2 esq. Eje Central San Juan del Río, Querétaro C.P. 76800. (Tel: +52 1 442 327 1229; e-mail: tlalocdeh@hotmail.com).*

***Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Garman A.C.Av. Andamaxei # 64/40 Paseos del Bosque, Corregidora, Querétaro C.P.76910. (Tel: +52 1 442 4498342; e-mail: indetec.ac@gmail.com).*

Abstract: This study introduces a cooperative outsourcing framework that integrates economic efficiency and social justice through mechanisms of participation, governance, and public support. A Bayesian network model, combined with Monte Carlo simulation, is employed to analyze the interdependencies among key variables affecting economic sustainability in production networks. Simulation results indicate that cooperative scenarios supported by public policies (S2) achieve the highest levels of economic sustainability and labor stability, while also maintaining structural resilience under adverse conditions (S3). From the perspective of Industrial Engineering, the findings suggest that cooperation and equity strengthen social cohesion, enhance operational efficiency, and improve the adaptive capacity of production systems under uncertainty. The combined use of Bayesian modeling and Monte Carlo simulation is identified as an effective analytical approach for decision-making under uncertainty, enabling simultaneous evaluation of technical, social, and economic variables. Future research should empirically validate the model using data from Mexican cooperatives and incorporate temporal, environmental, and productivity indicators to increase its relevance in industrial contexts and facilitate the transition toward sustainable and circular cooperative production networks.

Keywords: Cooperative outsourcing, Bayesian networks, Monte Carlo simulation, Industrial engineering, Circular economy.

1. INTRODUCTION

El outsourcing es un modelo centrado en la expresión de funciones secundarias, que cambia las estructuras laborales y las cadenas de valor, enviando operaciones a terceros con el fin de disminuir costos incrementando la flexibilidad contractual (Kumar et al., 2025). Este fenómeno se ha consolidado como una práctica predominante en la gestión empresarial global. Se asocia con una economía lineal caracterizada por el consumo acelerado debido a una producción masiva, y la generación constante de residuos. Según Buranbaeva et al. (2021) el outsourcing fortaleció la competitividad de las empresas multinacionales, generando desigualdades, precarización del trabajo y desconexión entre la producción y nocivos impactos ambientales y sociales.

El outsourcing ha desfavorecido el desarrollo equitativo al reproducir dinámicas extractivas y concentra el valor en centros corporativos, transfiriendo costos sociales y ecológicos hacia la periferia productiva (Ni et al., 2023), incrementando la crisis climática y la demanda de sostenibilidad a los límites. De acuerdo con Oluwagbemisola et al. (2025), la dependencia de cadenas globales extendidas muestra su fragilidad frente a eventos disruptivos como la pandemia de COVID-19, conflictos geopolíticos y crisis energéticas, evidenciando la necesidad de reconfigurar los sistemas de producción hacia esquemas más resilientes, locales y colaborativos

Por otra parte, la transición hacia una economía circular y social es evidente como respuesta estructural a los desequilibrios del outsourcing tradicional, al reemplazar el paradigma lineal —producir, usar y desechar— por un modelo regenerativo basado en reducción, reutilización, reparación y reciclaje (Merli et al., 2018). Según estudios realizados por Alrawashdeh et al. (2025), la transformación requiere rediseñar procesos industriales, productos y tecnologías que prolonguen el ciclo de vida de materiales y energía. Sin embargo, más allá de la innovación técnica, la circularidad requiere de un rediseño institucional en donde las cooperativas y redes solidarias actúen como agentes de sostenibilidad.

Las cooperativas constituyen un enlace entre la eficiencia económica y la equidad social. Agussalim & Achmad (2025) plantean que las cooperativas promueven la participación, corresponsabilidad y redistribución justa de los beneficios. Las cooperativas fortalecen la inclusión en la toma de decisiones, generando un capital social como factor esencial para la resiliencia comunitaria (Новосёлова, 2025).

La convergencia entre circularidad y cooperación implica repensar cadenas de suministro bajo criterios éticos, ecológicos y tecnológicos. Para Agyemang et al. (2019),

sectores industriales como el automotriz, implementar la circularidad requiere superar barreras culturales y organizacionales mediante liderazgo colaborativo y transferencia de conocimiento. Por otra parte, la digitalización, la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT) permiten trazar materiales, optimizar procesos y reducir desperdicios, consolidando una producción inteligente y descentralizada (Fuentes-Peñailillo et al., 2024). Martini et al. (2024) sugieren que la Industria 4.0 y 5.0 bridan nuevas opciones para implementar programas de sostenibilidad, tecnología y cooperación humana.

Para transformar los procesos hacia una economía social y circular, se requiere una reconfiguración del contrato social en la producción, en donde la subcontratación, se plantea como una operación de corresponsabilidad y conocimiento, en donde los recursos y beneficios se distribuyen equitativamente. Si las cooperativas modernas integran innovación digital, economía verde y valores solidarios, es posible llevar a cabo una transformación, mediante una red de colaboración entre actores interdependientes y capaces de generar valor compartido (Misfah et al., 2024).

Para Shashi et al. (2023), el outsourcing se basa en la ventaja comparativa de los costos laborales, mientras que la economía circular apuesta por la ventaja colaborativa: crear valor mediante conocimiento compartido, eficiencia energética e innovación verde. La creación de redes productivas sostenibles, sustentadas en confianza y transparencia, requieren nuevas métricas de gobernanza más allá del beneficio financiero inmediato. La contabilidad cooperativa, el reporting ambiental y la medición del impacto social son esenciales para evaluar la sostenibilidad integral (Bodenstein Fouché & Polo-Garrido, 2024).

Las experiencias internacionales muestran que las cooperativas equilibran rentabilidad y sostenibilidad. De acuerdo con Peediyeckal Devassia et al. (2025), en Italia, la banca cooperativa fortalece el tejido económico mediante financiamiento ético y responsabilidad social. De igual modo, las cooperativas de crédito canadienses destacan por integrar valores comunitarios en su gestión financiera (Dia et al., 2022). Así, la gestión estratégica cooperativa incorpora sistemas contables e informativos basados en sostenibilidad y participación (Susilawati, 2022).

Si se orienta hacia la cooperación interorganizacional, el outsourcing dentro del sector cooperativo puede tener un papel transformador. Buranbaeva et al. (2021) plantea que no se busca la reducción de costos, sino la especialización colaborativa y la creación de sinergias entre actores con objetivos comunes. Este “outsourcing cooperativo” distribuye funciones entre entidades autónomas bajo principios de transparencia, equidad y sostenibilidad, fortaleciendo la resiliencia de las redes productivas, la innovación local y el empleo digno.

La inteligencia artificial verde optimiza el uso de recursos y reduce la huella de carbono (Bolón-Canedo et al., 2024), mientras que la innovación en energías renovables y las políticas ambientales impulsan a las industrias más limpias (Yang et al., 2022; Zhang et al., 2022). Para (Singhania & Saini (2022) la integración de indicadores ESG evalúa el desempeño empresarial de manera integral. De esta forma, las organizaciones que combinan cooperación, circularidad y digitalización se desarrollan como modelos viables y sostenibles (Das et al., 2024).

Considerando el factor humano, la Industria 5.0 hace énfasis en la innovación, buscando un equilibrio entre automatización, ética y sostenibilidad (Martini et al., 2024). Lo cual concuerda con los estudios realizados por Dhayal et al. (2024), que plantea a la economía social, como promotor de bienestar colectivo, innovación verde y capacitación cooperativa para fortalecer la resiliencia ante la incertidumbre global.

El paso del outsourcing hacia la economía social y circular no implica una sustitución de modelos, sino una evolución sistémica hacia procesos más conscientes y colaborativos, que articulen el conocimiento tecnológico, la gobernanza democrática y la ética empresarial. Según Stahel (2020), la descentralización inteligente y la redistribución del poder productivo son pilares esenciales de economías regenerativas basadas en cooperación e innovación, en donde las redes productivas sostenibles se basan en la calidad de las interrelaciones entre actores comprometidos con un propósito común.

Entender las estrategias cooperativas como alternativa al outsourcing tradicional puede ofrece un marco teórico y práctico para la creación de redes productivas sostenibles, capaces de equilibrar eficiencia económica, justicia social y sostenibilidad ambiental (Kumar et al., 2025; Singh et al., 2025; Carreño-Ortiz et al., 2025). Este estudio pretende comprender y promover esta transición conceptual y operativa desde la Ingeniería Industrial, para combinar la eficiencia operativa, responsabilidad social y sostenibilidad ambiental, en un enfoque cooperativo y circular para optimiza recursos, dignifica la participación humana y fortalece la cohesión social.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló bajo un enfoque cualitativo–exploratorio, sustentado en el análisis teórico y comparativo de experiencias nacionales e internacionales de cooperación económica, como el mostrado por Yin (2018), en donde se revisaron más de 40 fuentes académicas y documentales relacionadas con la evolución del outsourcing, la economía social y los modelos de resiliencia organizacional, incluyendo informes de organismos como la OIT (2021) y la CEPAL (2022).

Se analizaron casos de redes cooperativas europeas como Mondragón Corporación Cooperativa en España y los consorcios italianos solidarios de Emilia-Romaña junto con experiencias latinoamericanas vinculadas al programa NODESS en nuestro país, orientadas a la construcción de ecosistemas productivos sostenibles, como los mostrados por Gómez-Uranga, Zabala-Iturriagagoitia (2020) y Gaiger (2021).

2.1 Diseño del modelo bayesiano conceptual

A partir de la literatura y del análisis de experiencias previas, se propone un modelo de red bayesiana conceptual (Figura 1) que describe las interrelaciones entre los factores determinantes del outsourcing cooperativo. La estructura incluye siete nodos principales: Participación cooperativa (PC), Distribución del valor (DV), Estabilidad laboral (EL), Resiliencia territorial (RT), Sostenibilidad económica (SE), Gobernanza cooperativa (GC) y Apoyo de políticas públicas (AP). La participación cooperativa influye directamente en la distribución del valor y la estabilidad laboral, las cuales afectan la resiliencia territorial; esta, a su vez, determina la sostenibilidad económica. GC y AP actúan como variables moderadoras externas que fortalecen o debilitan el sistema.

Figura 1. Red bayesiana conceptual del outsourcing cooperativo.

Cada nodo representa una variable clave en la cadena de valor industrial, y sus dependencias fueron establecidas con base en estudios previos sobre optimización de procesos, resiliencia organizacional y propagación de riesgos en manufactura (Jensen & Nielsen, 2007; Borunda et al., 2016; Cai et al., 2017).

El algoritmo K2 (Jensen & Nielsen, 2007) se utilizó para construir la estructura de la red, aplicando una búsqueda heurística de las relaciones de dependencia más probables entre nodos (Apendice A). Este método, poco común en la ingeniería de procesos y análisis de fallas, garantiza una estructura dirigida acíclica que refleja relaciones de causa y efecto coherentes.

Las probabilidades condicionales se asignaron mediante distribuciones Beta, ajustadas a los rangos plausibles reportados por Fishman (2015), Bishop (2019) y a la evidencia de procesos industriales bajo condiciones de incertidumbre reportados por Qazi et al. (2023), Zhang y Marsh (2021).

2.2. Fuentes de datos

Se emplearon fuentes secundarias provenientes de bases de datos académicas, informes técnicos y estudios de caso que documentan la aplicación de estrategias cooperativas, la evaluación de riesgos y la adopción de tecnologías sostenibles en sistemas industriales.

Las variables seleccionadas corresponden a categorías observadas en investigaciones sobre:

a) Evaluación de riesgos en cadenas de suministro.
b) Optimización de procesos industriales.
c) Resiliencia y adaptabilidad de sistemas organizacionales.
d) Propagación de riesgos y simulación estocástica.

Los valores iniciales y las relaciones causales derivan de la integración de estas fuentes y de la validación cruzada con marcos teóricos de sostenibilidad y economía circular.

2.3 Simulación Monte Carlo y escenarios

Para explorar el comportamiento dinámico del sistema, se aplicó una simulación Monte Carlo con 10,000 iteraciones por escenario utilizando parámetros probabilísticos definidos por el modelo bayesiano. Este enfoque permite representar la incertidumbre inherente a los sistemas productivos y evaluar la sensibilidad de las variables ante distintos contextos de gobernanza y cooperación. Se definieron cuatro escenarios representativos:

• S0 (Outsourcing tradicional): Baja participación cooperativa, apoyo institucional nulo y gobernanza débil.
• S1 (Transición cooperativa): Participación media, políticas incipientes y distribución moderada del valor.
• S2 (Cooperativo con política pública): Alta colaboración, apoyo gubernamental y equidad distributiva.
• S3 (Choque adverso): Condiciones externas desfavorables con resiliencia media-alta del sistema.

Tabla 1. Definición de escenarios y parámetros iniciales

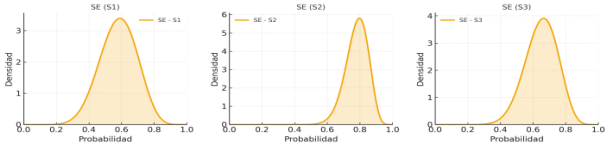
Escenario	Descripción general	PC	AP	GC	DV	RT
S0	Outsourcing tradicional	Baja	Nulo	Débil	Baja equidad	Frágil
S1	Transición cooperativa	Media	Limitado	En desarrollo	Moderada	Media
S2	Cooperativo con política pública	Alta	Alto	Fuerte	Alta equidad	Alta
S3	Choque adverso	Alta	Medio	Fuerte	Alta	Media-alta

Los resultados de las simulaciones permiten analizar la robustez del modelo cooperativo frente a perturbaciones, estimando la probabilidad de alcanzar altos niveles de sostenibilidad económica (SE) y resiliencia territorial (RT) en comparación con el modelo de outsourcing tradicional.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados de la simulación muestran un incremento sistemático de la probabilidad de sostenibilidad económica (SE) al pasar de S0 a S2; ante un choque adverso (S3), la resiliencia territorial (RT) permite mantener niveles aceptables de desempeño. Las distribuciones de probabilidad por variable (Figura 2) presentan sesgo positivo en PC, DV y SE bajo S2, reflejando alta probabilidad de éxito. La comparación agregada por escenarios (Figura 3) indica SE=0.41 (IC95%: 0.37–0.45) en S0; SE=0.58 (0.52–0.63) en S1; SE=0.78 (0.72–0.83) en S2; y SE=0.65 (0.60–0.70) en S3.

Figura 2a. Distribuciones continuas de SE por escenario (Monte Carlo)



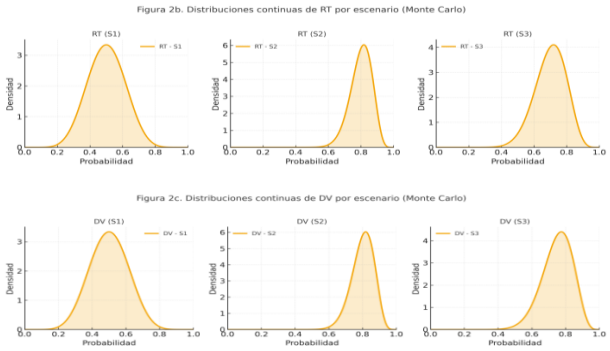


Figura 2. Distribuciones de probabilidad simuladas (Monte Carlo).

3.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad (Tabla 2) confirma que la participación cooperativa (PC) y el apoyo público (AP) son las variables con mayor influencia positiva sobre SE, seguidas por la gobernanza cooperativa (GC) y la distribución del valor (DV).

Tabla 2. Sensibilidad de variables en la red bayesiana

Variable	Correlación con SE	Interpretación
Participación cooperativa (PC)	0.82	Influencia principal
Apoyo público (AP)	0.75	Refuerzo estructural
Gobernanza cooperativa (GC)	0.68	Factor institucional
Distribución del valor (DV)	0.63	Factor social directo
Estabilidad laboral (EL)	0.55	Efecto de segundo orden
Resiliencia territorial (RT)	0.47	Resultado sistémico

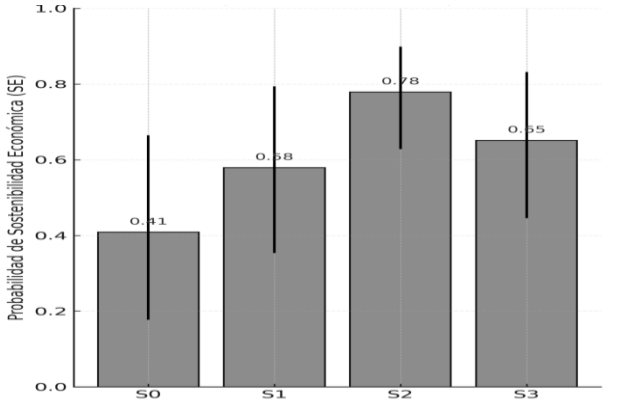


Figura 3. Comparación de escenarios (Simulación Monte Carlo).

3.2 Análisis y discusión de los resultados

Los resultados evidencian un incremento progresivo de la sostenibilidad económica (SE) conforme las redes productivas evolucionan del modelo de outsourcing tradicional (S0) al cooperativo con respaldo institucional (S2). Este comportamiento, visualizado en la Figura 3, muestra una tendencia ascendente en los valores promedio de SE —de 0.41 en S0 a 0.78 en S2—, lo que refleja una mejora estructural en la eficiencia y resiliencia del sistema. Incluso ante perturbaciones externas (S3), el modelo mantiene un desempeño estable, confirmando la robustez adaptativa de los sistemas cooperativos frente a escenarios de crisis.

La Figura 3 permite interpretar esta evolución como una optimización sistémica de la cadena de valor, donde la cooperación, la gobernanza y el apoyo público sustituyen los mecanismos tradicionales de subcontratación basados únicamente en costos. Las distribuciones de probabilidad representadas en la Figura 2 refuerzan este patrón, mostrando un sesgo positivo en las variables PC (Participación Cooperativa), DV (Distribución del Valor) y SE (Sostenibilidad Económica) bajo S2. Este comportamiento probabilístico indica una alta probabilidad de éxito cuando las decisiones industriales incorporan cooperación y apoyo institucional.

El análisis de sensibilidad (Tabla 2) confirma que PC (0.82) y AP (0.75) son los factores más influyentes sobre SE, seguidos de GC (0.68) y DV (0.63). El escenario S2 demuestra un equilibrio óptimo entre productividad y estabilidad, característico de los sistemas industriales sostenibles. En cambio, el escenario S3 mantiene una SE de 0.65 gracias al efecto amortiguador de la resiliencia territorial (RT), lo cual sugiere que los modelos cooperativos actúan como sistemas con redundancia funcional, capaces de absorber perturbaciones sin comprometer la continuidad operativa.

Desde el punto de vista metodológico, la combinación de redes bayesianas y simulación Monte Carlo permitió cuantificar la incertidumbre inherente a las decisiones industriales, proporcionando una herramienta eficaz para evaluar escenarios bajo riesgo y variabilidad. Este enfoque probabilístico supera las limitaciones de los modelos deterministas tradicionales y ofrece a los ingenieros industriales una vía para integrar toma de decisiones basadas en evidencia y optimización estocástica.

Figura 3. Comparación de escenarios (Simulación Monte Carlo).

3.2 Análisis y discusión de los resultados

Los resultados evidencian un incremento progresivo de la sostenibilidad económica (SE) conforme las redes productivas evolucionan del modelo de outsourcing tradicional (S0) al cooperativo con respaldo institucional (S2). Este comportamiento, visualizado en la Figura 3, muestra una tendencia ascendente en los valores promedio de SE —de 0.41 en S0 a 0.78 en S2—, lo que refleja una mejora estructural en la eficiencia y resiliencia del sistema. Incluso ante perturbaciones externas (S3), el modelo mantiene un desempeño estable, confirmando la robustez adaptativa de los sistemas cooperativos frente a escenarios de crisis.

Las distribuciones de probabilidad representadas en la Figura 2 refuerzan este patrón, mostrando un sesgo positivo en las variables PC (Participación Cooperativa), DV (Distribución del Valor) y SE (Sostenibilidad Económica) bajo S2. Este comportamiento probabilístico indica una alta probabilidad

de éxito cuando las decisiones industriales incorporan cooperación y apoyo institucional.

El análisis de sensibilidad (Tabla 2) confirma que PC (0.82) y AP (0.75) son los factores más influyentes sobre SE, seguidos de GC (0.68) y DV (0.63). En términos de planeación industrial, esto implica que fortalecer la participación de los trabajadores, la coordinación interinstitucional y la equidad en la distribución del valor contribuye directamente a la sostenibilidad operativa y a la resiliencia organizacional.

El escenario S2 demuestra un equilibrio óptimo entre productividad y estabilidad, característico de los sistemas industriales sostenibles. En cambio, el escenario S3 mantiene una SE de 0.65 gracias al efecto amortiguador de la resiliencia territorial (RT), lo cual sugiere que los modelos cooperativos actúan como sistemas con redundancia funcional, capaces de absorber perturbaciones sin comprometer la continuidad operativa.

Desde el punto de vista metodológico, la combinación de redes bayesianas y simulación Monte Carlo permitió cuantificar la incertidumbre inherente a las decisiones industriales, proporcionando una herramienta eficaz para evaluar escenarios bajo riesgo y variabilidad. Este enfoque probabilístico supera las limitaciones de los modelos deterministas tradicionales y ofrece a los ingenieros industriales una vía para integrar toma de decisiones basadas en evidencia y optimización estocástica.

En conjunto, los resultados de las Figuras 2 y 3 y la Tabla 2 muestran que la transición hacia modelos cooperativos y circulares no solo incrementa la sostenibilidad social, sino que mejora la eficiencia técnica y económica en entornos industriales complejos. Este marco puede servir como base para rediseñar procesos productivos, cadenas de suministro y estrategias de gestión de riesgos orientadas a la sostenibilidad.

4. CONCLUSIONES

El estudio propone e ilustra un marco de outsourcing cooperativo que integra eficiencia económica y justicia social mediante la participación, la gobernanza y el apoyo público. Los resultados obtenidos a través de la simulación de Monte Carlo muestran que los escenarios cooperativos respaldados por políticas públicas (S2) alcanzan los niveles más altos de sostenibilidad económica y estabilidad laboral, además de mantener resiliencia estructural ante situaciones de choque (S3). Desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial, estos hallazgos evidencian que la cooperación y la equidad no sólo fortalecen el tejido social, sino que también mejoran la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta de los sistemas productivos frente a la incertidumbre. La combinación de redes bayesianas y simulación Monte Carlo se consolida como una herramienta analítica eficaz para incorporar la incertidumbre en la toma de decisiones industriales, permitiendo evaluar la interacción entre variables técnicas, sociales y económicas. Finalmente, se recomienda desarrollar validaciones empíricas con datos de cooperativas mexicanas y extender el modelo con métricas temporales, de impacto ambiental y de productividad industrial, con el fin de consolidar su aplicabilidad en entornos reales y fortalecer la transición hacia redes productivas sostenibles y economías circulares cooperativas.

REFERENCIAS

Agussalim, A., & Achmad, A. (2025). COOPERATIVES: Problems and Sustainable Strategy Management. *Jurnal PenKoMi : Kajian Pendidikan Dan Ekonomi*, *8*(2), 339–344. https://doi.org/10.33627/pk.v8i2.3473

Agyemang, M., Kusi-Sarpong, S., Khan, S. A., Mani, V., Rehman, S. T., & Kusi-Sarpong, H. (2019). Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry. *Management Decision*, *57*(4), 971–994. https://doi.org/10.1108/MD-11-2018-1178

Alrawashdeh, S. J. M., Kumar, K., Deshpande, M. R., Raathi, R., & Teltumbade, G. R. (2025). Circular Economy—Innovative Strategies and Sustainable Solutions. In J. A. Parray, N. Shameem, & A. K. Haghi (Eds.), *Management of Waste to Control Environmental Pollutions: Sustainability and Economic Feasibility* (pp. 115–127). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80845-6_10

Bodenstein Fouché, K., & Polo-Garrido, F. (2024). Corporate reporting by cooperatives: Mapping the landscape and identifying determinants. *Journal of Contemporary Accounting & Economics*, *20*(3), 100436. https://doi.org/10.1016/j.jcae.2024.100436

Bolón-Canedo, V., Morán-Fernández, L., Cancela, B., & Alonso-Betanzos, A. (2024). A review of green artificial intelligence: Towards a more sustainable future. *Neurocomputing*, *599*, 128096. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128096

Borunda, A., Flores, M., & García, L. (2016). Aplicación de redes bayesianas en sistemas de manufactura flexible. Journal of Industrial Engineering.

Buranbaeva, L. Z., Ishnazarov, D. U., Nurova, A. R., Sabirova, Z. S., & Yuldybaev, B. R. (2021). Outsourcing in the Cooperative Sector of the Economy. In A. V. Bogoviz, A. E. Suglobov, A. N. Maloletko, O. V. Kaurova, & S. V. Lobova (Eds.), *Frontier Information Technology and Systems Research in Cooperative Economics* (Vol. 316, pp. 907–913). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57831-2_97

Cai, B., et al. (2017). Bayesian networks in fault diagnosis of industrial processes. Reliability Engineering & System Safety, 162, 87–101.

Carreño-Ortiz, J., Escobar-Sierra, M., & Lopez-Perez, F. (2025). Theoretical relationship between circular economy and social innovation from a sustainable development perspective. *Humanities and Social Sciences Communications*, *12*(1), 1549. https://doi.org/10.1057/s41599-025-05862-0

Das, S. K., Bressanelli, G., & Saccani, N. (2024). Clustering the Research at the Intersection of Industry 4.0 Technologies, Environmental Sustainability and Circular Economy: Evidence from Literature and Future Research Directions. *Circular Economy and Sustainability*, *4*(4), 2473–2504. https://doi.org/10.1007/s43615-024-00393-3

Dhayal, K. S., Agrawal, S., Agrawal, R., Kumar, A., & Giri, A. K. (2024). Green energy innovation initiatives for environmental sustainability: current state and future research directions. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(22), 31752–31770. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33286-x

Dia, M., Takouda, P. M., & Golmohammadi, A. (2022). Assessing the performance of Canadian credit unions using a three-stage network bootstrap DEA. *Annals of Operations Research*, *311*(2), 641–673. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03612-w

Fuentes-Peñailillo, F., Gutter, K., Vega, R., & Silva, G. C. (2024). Transformative Technologies in Digital Agriculture: Leveraging

Internet of Things, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Smart Crop Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, *13*(4), 39. https://doi.org/10.3390/jsan13040039

Grossi, L. B., Lange, L. C., & Amaral, M. C. S. (2024). Transition pathway towards more sustainable waste management practices for end-of-life reverse osmosis membranes: Challenges and opportunities in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *435*, 140571. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140571

Halilintar, M. (2018). Cooperatives and Economic Growth in Indonesia. *EUROPEAN RESEARCH STUDIES JOURNAL*, *XXI*(Issue 2), 611–622. https://doi.org/10.35808/ersj/1027

Новосёлова, Э. А. (2025). ВКЛАД КООПЕРАТИВОВ В РАЗВИТИЕ СОЦИАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ: CONTRIBUTION OF COOPERATIVES TO THE DEVELOPMENT OF THE SOCIAL ECONOMY. Вестник Сибирского университета потребительской кооперации, 1(51). https://doi.org/10.48642/7087.2025.48.45.002

Jensen, F. V., & Nielsen, T. D. (2007). Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer

Koshy, B. A., R, M., K A, R., & A S, S. (2023). SUSTAINABLE REPORTING FOR A RESILIENT, RESPONSIBLE AND RELIABLE FUTURE: CASE OF INFOSYS. *Journal of Research Administration*, *5*(2). https://doi.org/10.53555/jra.v5i2.825

Kumar, M., Rani, P., Mangla, N., Nguyen, N. T., & Kaur, K. (2025). Sustainable Outsourcing in an AI-Driven World: Ethical, Economic, and Environmental Perspectives. In M. Yadav, A. Pandey, & G. Huzooree (Eds.), *Advances in Computational Intelligence and Robotics* (pp. 1–24). IGI Global Scientific Publishing. https://doi.org/10.4018/979-8-3373-1270-5.ch001

Kumari, P. S. R., Makhija, H., Sharma, D., & Behl, A. (2022). Board characteristics and environmental disclosures: evidence from sensitive and non-sensitive industries of India. *International Journal of Managerial Finance*, *18*(4), 677–700. https://doi.org/10.1108/IJMF-10-2021-0547

Martini, B., Bellisario, D., & Coletti, P. (2024). Human-Centered and Sustainable Artificial Intelligence in Industry 5.0: Challenges and Perspectives. *Sustainability*, *16*(13), 5448. https://doi.org/10.3390/su16135448

Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 703–722. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112

Misfah, M., Rizka, & Muthoifin. (2024). Management Strategies of the Modern Islamic Boarding School Assalaam Cooperative to Enhance Productive Economy in Supporting the Achievement of SDGs. *Profetika: Jurnal Studi Islam*, *25*(02), 405–420. https://doi.org/10.23917/profetika.v25i02.2182

Ni, L., Ahmad, S. F., Alshammari, T. O., Liang, H., Alsanie, G., Irshad, M., Alyafi-AlZahri, R., BinSaeed, R. H., Al-Abyadh, M. H. A., Abu Bakir, S. M. M., & Ayassrah, A. Y. A. B. A. (2023). The role of environmental regulation and green human capital towards sustainable development: The mediating role of green innovation and industry upgradation. *Journal of Cleaner Production*, *421*, 138497. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138497

O'Dwyer, B., Humphrey, C., & Rowbottom, N. (2024). From institutional integration to institutional demise: The disintegration of the International Integrated Reporting Council (IIRC). *Critical Perspectives on Accounting*, *99*, 102699. https://doi.org/10.1016/j.cpa.2023.102699

Oluwagbemisola Faith Akinlade, Opeyemi Morenike Filani, & Priscilla Samuel Nwachukwu. (2025). Applied decision analytics supporting sustainable supply chain management in globalized economies. *Gulf Journal of Advance Business Research*, *3*(10), 1359–1375. https://doi.org/10.51594/gjabr.v3i10.164

Peediyeckal Devassia, B., Janarthanam, S., Karma, E., & Bisceglia, M. G. (2025). Cooperative Banking for A Sustainable Social Economy: Insights From Italy. *International Journal of Accounting and Economics Studies*, *12*(2), 121–129. https://doi.org/10.14419/s148r532

Qazi, A., et al. (2023). Monte Carlo simulation for uncertainty management in supply chains. International Journal of Production Research.

Shashi, Centobelli, P., Cerchione, R., Ertz, M., & Oropallo, E. (2023). What we learn is what we earn from sustainable and circular construction. *Journal of Cleaner Production*, *382*, 135183. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135183

Singh, S., Anand, A., Kalyani, & Awasthi, Y. (2025). From Linear to Circular: A Holistic Strategy for Sustainable Development in Emerging Economies. In R. Kumar & S. N. Mohanty (Eds.), *Sustainable Economy Models in the Age of Industry 5.0* (pp. 119–144). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-4104-8_8

Singhania, Dr. M., & Saini, Dr. N. (2022). Systems approach to environment, social and governance (ESG): Case of Reliance industries. *Sustainable Operations and Computers*, *3*, 103–117. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.11.003

Stahel, W. R. (2020). The circular economy and intelligent decentralization, nanotechnologies and materials, minerals and mining. *Nanotechnology Perceptions*, *16*(2), 151–168. https://doi.org/10.4024/N11ST20A.ntp.16.02

Stevens, K. A., Tang, T., & Hittinger, E. (2023). Innovation in complementary energy technologies from renewable energy policies. *Renewable Energy*, *209*, 431–441. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.115

Susilawati, M. (2022). Akuntansi Manajemen Strategik Pada Koperasi (Strategic Management Accounting In Cooperatives). *Akutansi Bisnis & Manajemen (ABM)*, *29*(2), 102. https://doi.org/10.35606/jabm.v29i2.1107

Yang, Q.-C., Zheng, M., & Chang, C.-P. (2022). Energy policy and green innovation: A quantile investigation into renewable energy. *Renewable Energy*, *189*, 1166–1175. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.046

Zhang, L., & Marsh, R. (2021). Probabilistic modeling and simulation in industrial risk analysis. Safety Science, 142, 105370

Zhang, D., Zheng, M., Feng, G.-F., & Chang, C.-P. (2022). Does an environmental policy bring to green innovation in renewable energy? *Renewable Energy*, *195*, 1113–1124. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.074

AquaGuard: An Interactive Website on the Quality of Surface Water Bodies in Mexico

Guadalupe Salas López*, Esteban Valente Arenas*, Hector Gerardo Pliego Lugo*, Jesús Enrique Serrano López*

** Tecnológico Nacional de México Campus Orizaba,*
(e-mail:gsalasmx@gmail.com)

Abstract: A major challenge facing Mexico is the multifaceted water crisis, characterized by growing scarcity and widespread contamination of surface water bodies. While institutions like the National Water Commission (CONAGUA) systematically monitor water quality through the National Water Quality Measurement Network (RENAMECA), the data is often presented in technical formats that are not easily accessible or understandable to the general public. This project, "AquaGuard," addresses this critical gap by proposing an interactive website designed to transform technical data into practical and comprehensible knowledge. The main objective is to raise public awareness about the quality of surface water bodies across Mexico and to promote water conservation practices, especially among young people. Our methodology is based on a mixed-method approach that includes document review, collection and processing of geospatial data from CONAGUA, and user-centered design. The platform will feature an intuitive, interactive map that uses a color-coded traffic light system (green, yellow, red) to display water quality. Upon selecting a water body, users can access detailed information on contaminants, associated health risks, and recommended treatment options. The site also includes an educational section and an interactive game to make learning about water care both fun and memorable. We expect "AquaGuard" to serve as a vital tool that empowers citizens to make informed decisions and actively participate in the sustainable management of water resources. This project directly contributes to the United Nations Sustainable Development Goal (SDG) 6: Clean Water and Sanitation.

Keywords: Water quality, Interactive website, Water conservation, Water culture, Public awareness.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se ha realizado con el propósito de responder a la creciente problemática de la calidad del agua superficial en México ,un tema de gran relevancia debido a que este recurso constituye un pilar para la vida humana, los ecosistemas y el desarrollo económico.
La motivación principal surge de la necesidad de acercar a la ciudadanía información clara, comprensible y actualizada sobre el estado de los cuerpos de agua en el país, ya que la falta de conocimiento limita la capacidad de acción comunitaria frente a los problemas de contaminación y escasez hídrica.
La calidad y la accesibilidad al agua representan uno de los principales retos del siglo xxi. De acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud, la escasez del vital líquido afecta a 40 % de la población mundial y, para 2025, se pronostica que 2 mil millones de personas carecerán de este insumo (Mendieta, 2018).

En el contexto científico, el interés por la calidad del agua se ha intensificado en las últimas décadas, debido al incremento de contaminantes físicos, químicos y biológicos en los ríos, lagos y zonas costeras. Diversos organismos nacionales e internacionales, como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA), han generado datos técnicos valiosos; sin embargo, estos resultados suelen presentarse en formatos especializados que son difíciles de interpretar para el público en general.

La poca disponibilidad de interfaces amigables ha limitado el impacto de estas investigaciones en la educación ambiental y en la adopción de prácticas sostenibles.

Existen trabajos previos que han desarrollado plataformas de monitoreo en otros países, como Balneabilidade (2021) en Brasil o FreshWater Watchers (s.f.) a nivel internacional, que muestran indicadores sobre contaminación y calidad hídrica. Asimismo, en México se han promovido iniciativas educativas como el portal Vórtice de Ecosistema de Cultura del Agua (s.f.), que emplea materiales didácticos y juegos para fomentar la cultura del agua. Sin embargo, aún no existe una herramienta como tal que combine de manera integrada la información técnica con recursos interactivos y educativos que fortalezcan la participación ciudadana en la conservación del recurso.

En este contexto, el objetivo del proyecto AquaGuard es diseñar e implementar un sitio web interactivo que integre datos oficiales sobre la calidad de cuerpos de agua superficiales en México, presente esta información mediante un sistema de semáforo comprensible para todos, y ofrezca herramientas educativas y lúdicas. De esta manera, se implementa la cultura hídrica ya que se busca aumentar la

conciencia pública y promover la adopción de prácticas de conservación del agua, con especial énfasis en el involucramiento de las nuevas generaciones.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio adopta un enfoque de investigación aplicada de tipo descriptivo-exploratorio, diseñado para transformar y contextualizar datos existentes sobre la calidad del agua en un producto digital accesible para el público general. La investigación se centra en el contexto nacional de México, tomando como base los cuerpos de agua superficiales distribuidos en diversas regiones del país. Este proyecto contribuye directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos de la Agenda 2030 de la ONU (2015). Al brindar información sobre la calidad del agua e información de tratamiento, donde se apoya la meta de reducir la contaminación y mejorar el tratamiento de aguas residuales. Además, al fomentar la concientización sobre el agua, el proyecto promueve un acceso sostenible y una gestión más racional de este recurso.

2.1 Recopilación de los datos

La recopilación de datos se realizó a partir de fuentes oficiales y confiables, como la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA) y el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los datos contienen registros detallados sobre cuerpos de agua lótico (Masas de agua que se mueven siempre en una misma dirección como ríos, riachuelos y arroyos), léntico (Aguas interiores quietas o estancadas, tales como, presas, lagos y embalses) y Costero (Aguas costeras, tales como, playas, bahías, marismas y estuarios) de CONAGUA (2025) que incluyen información geográfica y parámetros de calidad.

La muestra de datos fue seleccionada a partir de los registros oficiales, priorizando cuerpos de agua de distintas regiones para asegurar la representatividad. Las variables principales consideradas fueron los parámetros de calidad del agua establecidos por la normativa mexicana: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Coliformes Fecales, Escherichia coli, Enterococos, Saturación de Oxígeno Disuelto y Toxicidad (CONAGUA,2024).

El procesamiento de los datos se llevó a cabo utilizando herramientas de análisis de datos para su limpieza y usabilidad, garantizando la integridad de la información.

Con los datos se creó una base de datos con la información recopilada que incluye todos los datos de los cuerpos de agua como: coordenadas, nombre, municipio, estado, parámetros de calidad, semáforo de calidad, entre otros. El Instituto Tecnológico de Orizaba proporcionó el entorno institucional para el diseño y la programación de los componentes del proyecto.

2.2 Prototipo del sitio web

Se creó el prototipo de sitio web con un mapa interactivo utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), librerías de mapeo digital como OpenStreetmap, permitiendo la visualización de los datos, lenguajes de marcado, programación y hojas de estilos cascada como HTML, JavaScript y CSS respectivamente, para la creación del sitio web. Los cuerpos de agua son representados en forma de punto en toda la República Mexicana usando el color del semáforo de calidad el cual se determina por los colores "verde", "amarillo" y "rojo" se base en valores establecidos por CONAGUA (2024) para cada uno de los 8 indicadores. Los usuarios pueden buscarlos por nombre, localidad o por su propia ubicación.

El sistema de semáforo de calidad se basa en los valores establecidos por CONAGUA(2024) para cada uno de los ocho indicadores. En la Tabla 1 se muestra la clasificación de los indicadores por subtipo de cuerpo de agua que determinan el estado de calidad (rojo, amarillo o verde). Donde sí mínimo uno de los indicadores que se encuentran dentro de este campo se determina como incumplimiento, el semáforo automáticamente se va a rojo. Si mínimo uno de los indicadores que se encuentran dentro de este campo se determina como incumplimiento, el semáforo automáticamente se va a amarillo. Siempre y cuando no incumpla algún indicador del primer campo (CONAGUA,2024).

Al interactuar sobre cualquier cuerpo de agua permite ver su información detallada: nombre, ubicación, calidad del agua, parámetros detectados con su respectivo valor de medición y una escala de medición, recomendaciones de tratamiento, usos posibles sin/con tratamiento, definiciones y los riesgos, respaldado por normas mexicanas oficiales.

En cada parámetro detectado de cada cuerpo de agua se determina la calidad de cada parámetro en una escala de excelente, buena calidad, aceptable, contaminada, fuertemente contaminada en base al resultado de su medición, en la Tabla 2. Clasificación de calidad en cuerpos de agua en base a su parámetro según CONAGUA (2024), se muestran los rangos para determinar su calidad.

Tabla 1. Indicadores superficiales

Indicadores Superficiales			
Semáforo	Subtipo		
	Lótico	Léntico	Costero
Rojo	DBO	DBO	Enterococos
	DQO	DQO	
	TOX DM 48 h	TOX DM 48 h Sup	
		TOX DM 48 h Fon	
	TOX DM 15 min	TOX VF 15 min Sup	TOX VF 15 min Sup
		TOX VF 15 min Fon	TOX VF 15 min Fon
	SST	SST	SST

Amarillo	CF	CF	CF
	E.coli	E.coli	
	OD%	OD% Sup	OD% Sup
		OD% Med	OD% Med
		OD% Fon	OD% Fon
Verde	En caso de CUMPLIMIENTO de todos los indicadores		

En la sección de recomendaciones de tratamiento se realizaron investigaciones exhaustivas sobre purificación de agua, los procesos y métodos de tratamiento en base a las normas mexicanas vigentes: NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-127-SSA1-2021 Y NOM-230-SSA1-2002 (Norma oficial mexicana, 2022; Diario oficial, 1998; Diario Oficial de la Federación, 2021).

Los parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), aunque son cruciales para el tratamiento de efluentes, no son aplicables a la regulación del agua para consumo humano bajo la NOM-127-SSA1-2021 de Diario Oficial de la Federación (2021). De manera similar, la toxicidad, evaluada con bioindicadores como Daphnia magna o Vibrio fischeri, se utiliza para medir el impacto en cuerpos receptores y no como un criterio de potabilidad en sí mismo.

Estos parámetros son de vital importancia para las normativas que rigen las descargas de aguas residuales, como la NOM-002-SEMARNAT-1996 y la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, que buscan proteger la calidad de los cuerpos de agua nacionales. (CONAGUA, 2025; Norma oficial mexicana, 2022; Diario oficial, 1998)

Las recomendaciones de tratamiento se determinan por medio de cada parámetro detectado y usando su clasificación de calidad donde se agrupan en pares; fuertemente contaminada y contaminada, aceptable y buena calidad, y excelente. En base a esto se determinan los usos que se pueden hacer con dicha agua antes y después de algún proceso de tratamiento.

Tabla 2. Clasificación de calidad en cuerpos de agua en base su parámetro según CONAGUA

Parámetro (Unidad)	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente Contaminada
DBO (mg/L)	<= 3	>3 y <=6	>6 y <= 3	>30 y <= 120	> 120
DQO (mg/L)	<= 10	>10 y <= 20	>20 y <= 40	>40 y <= 200	> 200
SST (m g/L)	<= 25	>25 y <= 75	>75 y <= 150	>150 y <= 400	> 400
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	<= 100	>100 y <= 200	>200 y <= 1,000	>1,000 y <= 10,000	> 10,000
Escherichia coli (NMP/100 mL)	<= 126	>126 y <= 576	>576 y <= 850	>850 y <= 1,000	> 1,000
% Saturación de Oxígeno Disuelto	>70 y <= 110	(50-70] y (110-120]	(30-50] y (120-130]	(10-30] y (130-150]	<=10 y >150
Toxicidad Daphnia magna (UT)	< 1	1 y <= 1.33	>1.33 y < 5	>= 5	N/A
Toxicidad Vibrio fischeri (UT)	< 1	1 y <= 1.33	>1.33 y < 5	>= 5	N/A
Enterococos (NMP/100 mL) (Costero)	<= 100	>100 y <= 200	>200 y <= 500	>500	N/A

2.3 Implementación de Contenido Educativo y Lúdico

Para la materialización de los componentes interactivos del proyecto sobre la cultura hídrica, se desarrollaron dos videojuegos educativos. El objetivo principal fue crear herramientas didácticas y atractivas que permitieran a los usuarios comprender la importancia del cuidado del agua de una manera dinámica. La base tecnológica para ambos proyectos fue la combinación de HTML, CSS y JavaScript, lo que garantiza su accesibilidad a través de cualquier navegador web moderno.

2.3.1 Videojuego 1

Este primer juego es un simulador interactivo que busca generar conciencia sobre el impacto de la contaminación en los ecosistemas marinos. La mecánica consiste en que el jugador debe hacer clic sobre la basura que cae en el océano para eliminarla y reducir el nivel de contaminación. Mientras tanto, la contaminación aumenta progresivamente, y si alcanza el 100%, el juego termina. El reto aumenta con el tiempo, haciendo que la basura aparezca con mayor frecuencia y velocidad.

La implementación técnica se desglosa de la siguiente manera:

Se utilizó HTML para establecer la estructura fundamental de la interfaz. Se definieron contenedores semánticos para las distintas secciones: un área principal para el juego, un espacio para la interfaz de usuario (HUD) que muestra datos como el puntaje, y un par de pantallas superpuestas que manejan los mensajes de inicio y de fin de la partida. Un punto clave de la implementación es que los elementos interactivos, como los peces y la basura, no existen en el archivo HTML inicial; son generados y añadidos dinámicamente al área de juego mediante JavaScript.

Para el aspecto visual, se emplearon técnicas modernas para crear una atmósfera inmersiva. El fondo del océano fue creado con un degradado lineal que simula la profundidad. Se utilizaron variables de CSS para gestionar la paleta de colores de forma centralizada y eficiente. Las animaciones fueron un pilar fundamental, para lo cual se usó la regla @keyframes para dar vida a las olas, los efectos de clic, las puntuaciones flotantes y otros indicadores visuales. El efecto más importante es cómo la contaminación afecta a la fauna: esto se logró aplicando la propiedad filter de CSS (grayscale y blur) a los peces. La intensidad de este filtro se controla desde JavaScript, creando una conexión directa entre la lógica del juego y su apariencia visual. Finalmente, se implementó un

diseño responsivo con media queries para asegurar que el juego se visualice correctamente en cualquier tamaño de pantalla.

Se utilizó JavaScript como el motor completo del juego. La lógica se organizó bajo un paradigma de programación orientada a objetos, definiendo clases para manejar el estado general del juego, las entidades (peces, basura) y sus comportamientos específicos. Las animaciones y actualizaciones constantes se gestionan a través de un bucle de juego principal, optimizado con requestAnimationFrame para garantizar un rendimiento fluido. La lógica del juego incluye:

- o Generación dinámica de elementos: Los peces y la basura se crean como instancias de sus respectivas clases y se añaden al DOM en intervalos de tiempo controlados.
- o Interactividad: Se usan event listeners para detectar los clics del usuario sobre la basura, lo que ejecuta funciones para actualizar el puntaje y reducir la contaminación.
- o Escalado de dificultad: Para mantener el reto, el juego se vuelve más difícil a medida que el jugador avanza. La frecuencia y velocidad de la basura, así como el ritmo de aumento de la contaminación, se ajustan dinámicamente según el puntaje del jugador.

2.3.2 Videojuego 2

El segundo desarrollo es una trivia interactiva diseñada para evaluar y educar al usuario sobre datos importantes de la cultura hídrica. El juego permite al usuario introducir su nombre, elegir un nivel de dificultad (número de preguntas) y responder a una serie de preguntas de opción múltiple las cuales fueron obtenidas de CONAGUA. Al final, se muestra un resultado y, en caso de obtener una puntuación del 80%, se genera un certificado de "Guardián del Agua" que se puede imprimir.

La implementación de esta trivia se realizó de la siguiente forma:

Se utilizó HMTL para la estructura, se basa en un sistema de "pantallas", donde cada una corresponde a una fase del juego (inicio, preguntas, resultados y certificado). Estos contenedores se muestran u ocultan para guiar al usuario a través del flujo de la trivia. El archivo HTML define los contenedores y la maquetación base, como el lugar para la pregunta y los botones de respuesta, pero el contenido textual de las preguntas no está escrito en él; se carga dinámicamente desde JavaScript, lo que permite un código más limpio y fácil de mantener.

Se utilizó CSS para el estilo visual fue una prioridad para crear una experiencia de usuario agradable y moderna. Se importaron fuentes personalizadas para mejorar la tipografía y se aplicó un degradado lineal en el fondo. Para el contenedor principal, se usaron efectos de "glassmorphism" con la propiedad backdrop-filter para darle un toque contemporáneo. La retroalimentación al usuario es instantánea gracias a clases de CSS que cambian el color de los botones de respuesta según si la elección fue correcta o incorrecta. Adicionalmente, se crearon estilos específicos para el certificado y se utilizó una regla @media print para optimizar su diseño y ocultar elementos no deseados, como los botones, al momento de imprimir.

Toda la lógica interactiva se utilizó JavaScript. El núcleo de la trivia es una estructura de datos (un arreglo de objetos) que almacena el banco de preguntas, sus respuestas y la opción correcta. El script se encarga de:

- o Inicializar el juego: Captura la información del jugador, como su nombre y la dificultad elegida.
- o Aleatorizar y mostrar preguntas: Utiliza una función para barajar las preguntas y respuestas, asegurando que cada partida sea diferente. Luego, inserta dinámicamente el contenido en los elementos HTML correspondientes.
- o Gestionar eventos: Escucha los clics del usuario en las respuestas, verifica si la selección es correcta, actualiza el puntaje y aplica las clases de CSS para la retroalimentación visual.
- o Controlar el flujo: Tras responder, una breve pausa controlada por setTimeout da paso a la siguiente pregunta o a la pantalla de resultados final.
- o Generación condicional del certificado: Al terminar, evalúa el puntaje. Si es bueno, muestra una pantalla especial de certificado, insertando dinámicamente el nombre del jugador y la fecha para personalizarlo.

2.4 Pruebas y validación

Se llevaron a cabo pruebas de usabilidad y funcionalidad con usuarios de diversos perfiles desde profesores y alumnos, lo que permitió evaluar la claridad de la información y la facilidad de navegación del sitio.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Dado que el proyecto AquaGuard se encuentra en fase de desarrollo, la presente sección detalla los resultados esperados y las funcionalidades clave de la plataforma una vez que su implementación sea completada. Estos resultados representan el producto de la metodología descrita, cuyo objetivo es transformar los datos técnicos de la calidad del agua en conocimiento accesible para el público general (Figura 1)

Fig. 1. Sitio Web AquaGuard.

El principal resultado es un sitio web interactivo completamente funcional, accesible desde cualquier dispositivo. Este sitio web se compone de los siguientes elementos:

3.1 Mapa Interactivo Georreferenciado

Se ha desarrollado un mapa interactivo que visualiza la ubicación de los cuerpos de agua superficiales en la República Mexicana. Como resultado del procesamiento de datos, la calidad de cada punto se representa mediante un sistema de semáforo intuitivo (verde, amarillo y rojo), conforme a los criterios de clasificación descritos en la sección de Metodología. Al seleccionar un cuerpo de agua, los usuarios pueden acceder a información detallada, incluyendo:

- o Ubicación geográfica.
- o Clasificación de calidad.
- o Valores específicos de los contaminantes detectados.
- o Una descripción clara de los parámetros de calidad y los riesgos asociados a la salud y los ecosistemas.
- o Información sobre la importancia de la conservación de la fuente hídrica.

3.2 Guía de Tratamiento y Usos Recomendados

La plataforma ofrece recomendaciones para el tratamiento del agua con base en los parámetros y contaminantes identificados. Estas recomendaciones se fundamentan en las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) mencionadas previamente. Además, se proporcionan sugerencias sobre los usos apropiados del agua antes y después de su tratamiento, con el fin de promover un uso responsable del recurso.

3.3 Sección Educativa y Lúdica

Un resultado clave es la integración de una sección con contenido didáctico (infografías, videos y otros materiales) que simplifica temas complejos como los procesos de tratamiento de agua y la importancia de la conservación hídrica. Se han implementado juegos interactivos que, a través de la gamificación, buscan fomentar el aprendizaje de manera atractiva y memorable, especialmente entre las nuevas generaciones.

3.4 Funcionalidades de Búsqueda y Geolocalización

La plataforma cuenta con funcionalidades de búsqueda por nombre o ubicación, lo que permitirá a los usuarios identificar rápidamente cuerpos de agua de su interés o cercanos a su localización actual.

DISCUSIÓN

El desarrollo de AquaGuard busca contribuir a la solución de la problemática de la falta de acceso a información hídrica. A diferencia de iniciativas previas que se enfocan en la documentación técnica, este proyecto se distingue por la integración de datos oficiales con una interfaz amigable y herramientas educativas interactivas. Al transformar los datos de la CONAGUA en una experiencia accesible, se espera que la plataforma tenga un impacto significativo en la concientización ciudadana. Si bien el proyecto está en desarrollo, los resultados anticipados demuestran su potencial para cerrar la brecha entre la investigación científica y la acción social, contribuyendo directamente al cumplimiento del ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento.

4. CONCLUSIONES

El proyecto AquaGuard representa un avance significativo en la democratización del acceso a información crítica sobre la calidad del agua en México. Los resultados obtenidos hasta el momento, en la fase de planeación y desarrollo, confirman la viabilidad y la importancia de la plataforma como una herramienta para la concientización ciudadana. Al transformar datos técnicos de la CONAGUA en un formato visual y comprensible a través del sistema de semáforo y mapas interactivos, el proyecto logra cerrar la brecha entre la información científica y el público no especializado.

Los avances en el desarrollo del sitio web y la integración de las Normas Oficiales Mexicanas de Secretaria de Salud demuestran que es posible crear una herramienta tecnológica que no solo informa, sino que también educa y empodera a los usuarios para tomar decisiones más conscientes. La inclusión de juegos interactivos y una guía de recomendaciones de tratamiento del agua son aspectos clave que distinguen este proyecto de otras iniciativas, promoviendo una cultura hídrica activa, especialmente entre las nuevas generaciones.

Como perspectivas futuras se centrará en la implementación completa de la plataforma y en la realización de pruebas a gran escala para asegurar su funcionalidad y usabilidad. Se planea:

Validación de usabilidad: Ampliar las pruebas con usuarios de diferentes perfiles socioeconómicos y geográficos para optimizar la interfaz y la experiencia de usuario.

- Actualización de datos: Establecer un sistema para la actualización periódica de los datos de RENAMECA y SINA para garantizar que la información en el sitio web sea siempre relevante y actual.
- Expansión de funcionalidades: Considerar la inclusión de datos sobre la calidad del agua subterránea y la integración de reportes ciudadanos sobre la calidad de cuerpos de agua locales.
- Investigación de impacto: Realizar estudios para medir el impacto de la plataforma en la concientización sobre el agua y la adopción de prácticas de conservación.

En conclusión, AquaGuard no es solo un sitio web; es una propuesta de solución para un problema nacional, alineada con los objetivos de desarrollo sostenible y con un gran potencial para fomentar la participación social en la conservación y el manejo responsable del agua en México.

REFERENCIAS

Balneabilidade (2021) Gov.br. Disponible en: https://balneabilidade.ima.sc.gov.br/ (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

CONAGUA (2024) Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea, en Gob.mx. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/925192/Generalidades_Indicadores_de_calidad_del_agua.pdf (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

CONAGUA (2025) Resultados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA), gob.mx. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/articulos/resultados-de-la-red-nacional-de-medicion-de-calidad-del-agua-renameca (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

Diario oficial (1998) SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA, Gob.mx. Disponible en: https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

Diario Oficial de la Federación (2021) Gob.mx. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705 (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

Ecosistema de Cultura del Agua (sin fecha) Gob.mx. Disponible en: https://vortice.conagua.gob.mx/lista-interactivos (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

FreshWater watch (s.f) Freshwaterwatch.org. Disponible en: https://www.freshwaterwatch.org/ (Consultado: el 23 de septiembre de 2025).

Mendieta, A.A (2018) Presión sobre los recursos hídricos, Revista Especificar. Disponible en: https://especificarmag.com.mx/presion-sobre-los-recursos-hidricos/ (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

Morales, O.T. (2024) Crisis del agua en México se agrava; Conagua reporta caída de reservas al 36%, infobae. Disponible en: https://www.infobae.com/mexico/2024/06/05/crisis-del-agua-en-mexico-se-agrava-conagua-reporta-caida-de-reservas-al-36-y-cutzamala-al-27/ (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

Norma oficial mexicana (2022) NOM-001-SEMARNAT-2021 Gob.mx. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5

5645374&fecha=11/03/2022 (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

ONU (2015) Agua y saneamiento, Desarrollo Sostenible. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/ (Consultado: el 22 de septiembre de 2025).

Secretaria de Salud (s.f.) Normas Oficiales Mexicanas, gob.mx. Disponible en: https://www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705 (Consultado: el 23 de septiembre de 2025).

Flight Envelope Calculation for Low-Speed Aircraft

Diaz del Castillo Cabrera Azael Ruben*, Alvarado Jiménez Ian Yaocelotl*, Jiménez Ponce Luis Antonio*

** Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Estado de México.*
(e-mail: {202310595, 202320804, lajimenezp}@tese.edu.mx).

Abstract: The flight envelope is a graphical representation of an aircraft's ability to maintain different flight conditions or maneuvers without the risk of aerodynamic loads that compromise structural integrity, for conditions such as those used in SAE Aerodesign competitions. This study focuses on the calculation of the flight envelope for low-speed aircraft, using as a basis the relationship between speed, altitude, and thrust or power curves available, which starts from the intersection of the thrust or power curves, where the maximum and minimum speeds possible at different altitudes occur. The aircraft configuration is a flying wing with a span of 3.54m, aerodynamic profile MH78, a root chord of 90cm, tip chord of 31.5cm, and a dihedral of 15° with a trapezoidal wing surface shape. With the purpose of defining the operational limits and maneuverability that the aircraft can achieve without compromising its safety, in order of this various aerodynamic calculations are performed to determine parameters such as stall speed, the maximum speed in straight and level flight, and maneuvering speed, these values allow the establishment of a margin of safety against factors such as wind gusts or abrupt maneuvers. Additionally, the operating altitude is taken into account and changes in air density, as they directly influence the performance of the aircraft. The result of this analysis is graphically represented in an envelope that delineates the safe operating area, assisting in structural design and the appropriate choice of engine and propeller to use. This type of evaluation is essential to ensure the efficient performance of the aircraft, avoid structural failures or losses, and meet the objectives in design competitions and controlled flight.

Keywords: Flight envelope, Low-speed aircraft, Aerodynamic performance, Operational safety.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de envolvente de vuelo tiene sus orígenes en la primera mitad del siglo XX, cuando la aviación comenzó a evolucionar de experimentos pioneros hacia aeronaves más complejas. Durante la Primera Guerra Mundial se identificó la necesidad de cuantificar la resistencia estructural y las limitaciones de maniobra de los aviones de combate. Posteriormente, en las décadas de 1930 y 1940, con la expansión de la aviación comercial y militar, surgió la práctica de representar gráficamente la relación entre factor de carga y velocidad de vuelo en el denominado diagrama V–n o Envelope Diagram, el cual fue adoptado por organismos de certificación aeronáutica como la Civil Aeronautics Administration en Estados Unidos (antecesora de la FAA). Estos diagramas permitieron establecer categorías de aeronaves según sus factores de carga admisibles, sentando las bases para los actuales estándares de diseño y certificación. (Raymer, 2018)

En la actualidad, la envolvente de vuelo no sólo se emplea en la certificación de aeronaves de gran escala, sino también en el diseño preliminar de las naves ligeras y de baja velocidad. Su construcción resulta especialmente relevante en el ámbito de proyectos académicos y competencias nacionales e internacionales como SAE Aerodesign, donde parámetros como la densidad del aire, la potencia disponible y la geometría del ala tienen un impacto directo sobre el desempeño.

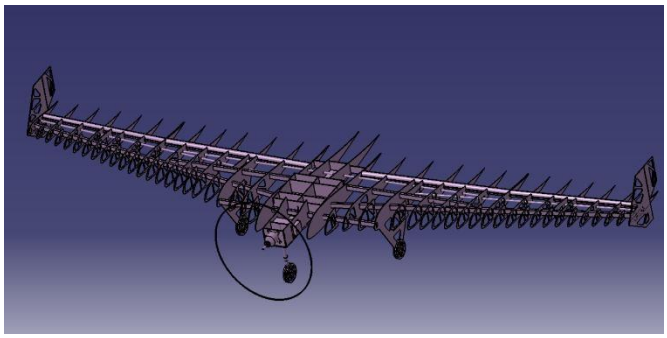


Fig. 1. Apariencia de la aeronave

La aeronave “Esther”, presenta una configuración de tipo ala voladora. Esta elección busca maximizar la eficiencia aerodinámica al reducir el arrastre y el peso estructural, incrementando la capacidad de carga útil. Posee una ala trapezoidal en vista superior, con un ángulo de flechado de 15° y utiliza el perfil aerodinámico tipo réflex MH78, que ayuda a mantener la estabilidad longitudinal sin necesidad de estabilizador horizontal. Está construida principalmente en madera balsa, con vigas de aluminio de sección transversal rectangular y circular. La configuración incluye un elevón y flaps por cada semi ala, además de end plates que sirven para

controlar el avión en tierra. En la tabla 1, se presentan las características de la aeronave de manera resumida.

Tabla 1. Características principales de la aeronave

Parámetro	Símbolo/Unidad	Dimensiones
Envergadura total	b (m)	3.54
Superficie alar	S (m²)	1.93
Alargamiento	AR = b²/S	6.49
Cuerda de raíz	Cr (m)	0.90
Cuerda de punta	Ct (m)	0.315
Cuerda aerodinámica media	CAM (m)	0.676
Ángulo de flechado	Λ (°)	15°
Peso máximo al despegue	MTOW (kg)	14.5

El estudio y cálculo de la envolvente de vuelo constituye una de las herramientas más importantes en el análisis y diseño de aeronaves, Luis Eduardo Miranda J. Rodríguez menciona que, la envolvente de vuelo es una representación gráfica de la capacidad de una aeronave para mantener una condición de vuelo recto y nivelado a una velocidad y altitud determinadas. A su vez al fijarse el factor de carga máximo para el proyecto en desarrollo, se observa de nuevo que la variación de la densidad del aire y el correspondiente aumento de la velocidad de pérdida influyen decisivamente en la capacidad estructural de la aeronave.

El diagrama de la envolvente de vuelo representa una forma gráfica de comprobar las limitaciones estructurales de un avión en función de la velocidad de vuelo en el factor de carga n al que se ha sometido al avión.

De igual manera, Luis Eduardo Miranda J. Rodríguez plantea una analogía con una montaña rusa, donde en determinados momentos de la atracción, una persona se siente más pesada o ligera en función del factor de carga al que esté sometido su cuerpo. (Miranda, 2011)

John. D. Anderson Jr. Nos indican los factores de carga máximo permitido para un avión se dividen en 2 categorías, el factor de carga límite que es el asociado con la deformación estructural permanente de una o más partes del avión y el factor de carga último donde éste es asociado con la falla estructural total y si se excede este factor, partes del avión se romperán. (Anderson, 2016)

2. METODOLOGÍA

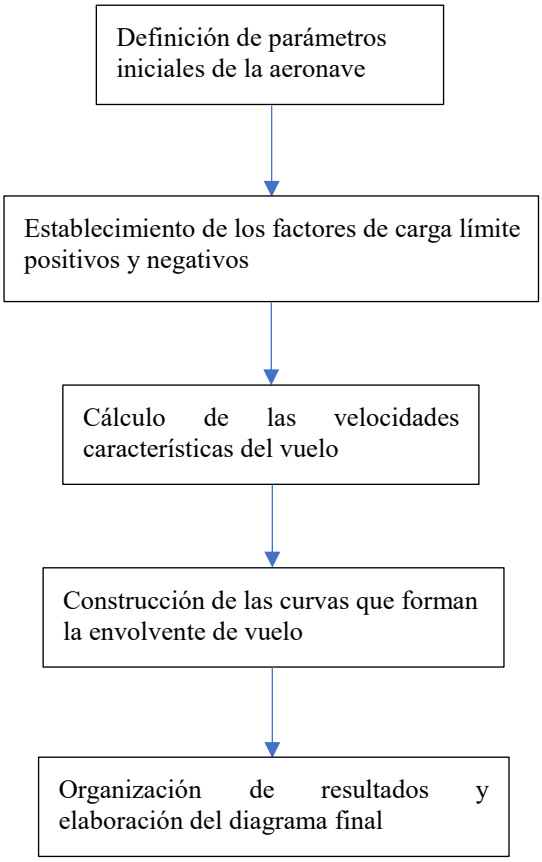


Fig. 2. Diagrama de metodología

2.1. DEFINICIÓN DE PARAMETROS INICIALES DE LA AERONAVE.

Para esta primera etapa se establecieron las condiciones de referencia para el análisis: Peso de la aeronave (W), superficie alar (S), Coeficiente máximo de levantamiento (CLmax) y densidad a la altitud de Querétaro (ρ = 1.0249 $kg/m3$).

Estos parámetros son la base para la determinación de los factores de carga y velocidades características operativas.

2.2 ESTABLECIMIENTO DE LOS FACTORES DE CARGA LÍMITE POSITIVOS Y NEGATIVOS.

El factor de carga límite negativo ($nlim\ neg$) dado por:

$$n_{\lim\ neg} =\geq 0.4 \cdot n_{\lim pos}$$
(1)

Y empleando un factor de carga limite positivo de 2, obtenido en pruebas de deflexión de vigas. sustituyendo la formula anterior (Ec. 1) nos queda un factor de carga límite negativo de 0.8.

Los factores de carga de rotura positivos y negativos se calcularon empleando la siguiente fórmula:

$$n_{ult} = 1.5 \cdot n_{lim\mp} \quad (2)$$

Dándonos un factor de carga de rotura positiva de 3 y negativa de 1.2.

2.3 CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES CARACTERÍSTICAS DEL VUELO

Se determinaron las siguientes velocidades:

- **Velocidad de punto de maniobra:** Calculada a partir de la siguiente formula

$$V^* = V_{estol} \cdot \sqrt{n_{max}} \quad (3)$$

Quedándonos un resultado de 16.5 m/s.

- **Velocidad de picada:** Dada con la siguiente formula

$$V_d = 1.25 \cdot V_{max} \quad (4)$$

Dando una velocidad de inmersión de 52.5 m/s.

2.4 CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS QUE FORMAN LA ENVOLVENTE DE VUELO

La envolvente se obtuvo aplicando la ecuación adimensional del factor de carga:

$$n_{max} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C}{Lmax_{2 \cdot W}} \quad (5)$$

Para cada intervalo de velocidad se calcularon los correspondientes factores de carga, positivos y negativos, hasta alcanzar las velocidades características definidas.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los cálculos se realizaron para el valor máximo de ráfaga igual a 15,25±[m/s] que puede alcanzar la aeronave a la velocidad de VC, y 7.65±[m/s] a la velocidad de VD.

Para calcular las líneas de curva en la envolvente de vuelo, se hizo uso de un factor de carga máximo $nmax$ = 2, el cual se obtuvo a través de las pruebas experimentales realizadas a la viga principal de la aeronave. Asimismo, para el análisis, se hizo uso de ρ = 1.0249 $kg/m3$, un factor de carga negativo $nlimneg$= 0.8, factores de carga de rotura positivos y negativos $nult-$ = 3, $nult+$= 1.2, velocidad de punto de maniobra $v*$= 16.551 m/s, velocidad de picada vd = 52.5 m/s.

Una vez teniendo los datos anteriores, se realizaron los cálculos correspondientes para obtener la envolvente de vuelo de la aeronave:

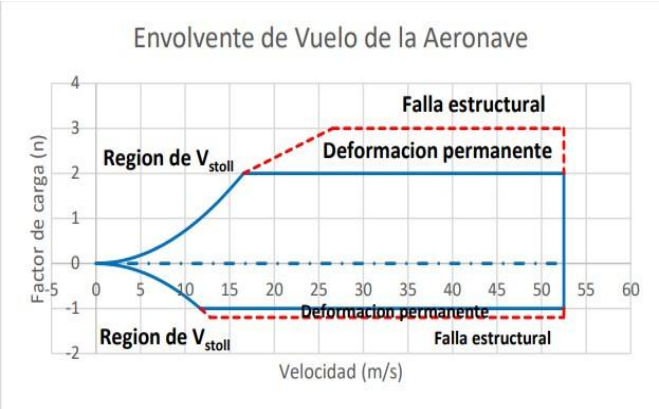


Fig. 3. Envolvente de vuelo

Del diagrama se obtiene que la velocidad de pérdida equivale a $vstall$ = 11.70 m/s, vlo = 14.04 m/s, los factores de carga máximos son $nmax+$ = 2, $nmax-$ = −1, la velocidad máxima es de $vmax$ = 52.5 m/s. De igual forma el diagrama muestra que después de un factor de carga de 2-3, la aeronave sufre deformaciones permanentes en la estructura, y rebasando un factor de carga de 3 existe una falla estructural.

El análisis de la envolvente de vuelo obtenida permite identificar las condiciones de operación seguras y las limitaciones estructurales de la aeronave diseñada.

En primer lugar, la velocidad de pérdida calculada corresponde a Vstall = 11.70 m/s, lo cual, es relativamente bajo y adecuado para una aeronave de competencia AeroDesign de baja velocidad. Esto indica que la aeronave podrá volar de forma estable en aproximaciones y despegues en pistas reducidas sin comprometer la estabilidad.

En cuanto a la velocidad de operación mínima Vlo = 14.04 m/s, valor superior de la velocidad la pérdida. Refleja que la aeronave deberá operarse con márgenes de seguridad cerca de la velocidad mínima.

Gracias al diagrama de envolvente de vuelo, nuestra aeronave muestra un rango operativo bastante amplio de (11.7 a 52.5 m/s), teniendo la capacidad de volar en distinto regímenes. En relación con los factores de carga, el avión soporta $nmax+$ = 2 y $nmax-$ = -1. Aunque es suficiente para un avión de baja velocidad, es un margen reducido comparado con aeronaves convencionales, que suelen tener +3.5 a +4. Por lo que requiere limitar maniobras bruscas o giros cerrados.

Por último, el diagrama muestra que entre 2-3g aparecen deformaciones permanentes, y por encima de 3g ocurre la falla estructural. Esto refleja que el avión está optimizado para transportar carga a baja velocidad, no para acrobacias, por lo que se puede discutir cómo este límite es aceptable.

4. CONCLUSIONES

La envolvente de vuelo obtenida confirma que la aeronave cumple con las condiciones necesarias para operar en baja velocidad, presentando una velocidad de pérdida adecuada (Vstall = 11.7 m/s).

El rango de operación es amplio (hasta 52.5 m/s), el diseño estructural muestra un límite de carga relativamente bajo (+2g), lo cual implica que la aeronave debe operarse con precaución y evitar maniobras bruscas, ya que se encuentra optimizada para la misión principal de transporte de carga ligera a baja velocidad, pero no para esfuerzos estructurales elevados.

Para finalizar, la envolvente valida la seguridad del diseño dentro de los márgenes de operación de la competencia, siempre que se respete la zona segura del diagrama y se eviten condiciones cercanas a la falla estructural. (Miranda, 2011)

5. REFERENCIAS

Raymer, D. P. & American Institute of Aeronautics and Astronautics, (2018) *Aircraft design: a conceptual approach*. 6th ed. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Miranda José Rodrigues, L. E., (2011). Fundamentos Da Engenharia Aeronáutica Aplicações Ao Projeto SAEAerodesign. São Paulo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

D. Anderson, J., (2016). *Fundamentals of Aerodynamics*. 6ª ed. New York: McGraw-Hill Education.

Gudmundsson, S., (2022). *GENERAL AVIATION AIRCRAFT DESIGN*. 2ª ed. United States: Butterworth-Heinemann.

Carmona, I., (2022) Aerodinámica y Actuaciones del Avión. 14a ed. España: Paraninfo.

H. Sadraey, M., (2023). *Aircraft Performance: An Engineering Approach.* Taylor & Francis Group.

Gordon Megson, T. H., (2021). *Aircraft Structures for Engineering Students*. 7ª ed. UK: ButterworthHeinemann.

Mechanical Behavior Analysis of a Composite Material Under Tensile Load: Simulation vs. Experimental Test

Álvarez González Fátima Jocelyn*, García Granados Claudia Mariana*, Guardian Acosta Christian Alejandro*, Lazarin Leaño José Manuel*

** Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx.*

202310688@tese.edu.mx, 202421144@tese.edu.mx, 202310626@tese.edu.mx, 202310714@tese.edu.mx.

Abstract: This research project evaluates a pellet burner prototype for coffee drying, utilizing residual biomass This project is about the manufacturing and evaluation of composite test specimens reinforced with carbon fiber, following the guidelines of ISO 527-4:2021. The main objective was to prepare standardized samples to study their structural properties and understand how the material behaves when it is subjected to different loads. To achieve this, molds were prepared and a manual lamination technique with epoxy resin was applied, combined with vacuum bag molding to ensure proper curing and good dimensional accuracy. After fabrication, the specimens were cut, finished, and checked to meet the required dimensions. Mechanical tests were performed, mainly tensile tests carried out in a real laboratory, and later complemented with computer simulations in SolidWorks to observe both tension and flexion behavior. The results showed that the specimens had an acceptable quality and uniformity, with one of them reaching a breaking point of 160.8 kg of force and another at 25.48 kg of force, depending on the orientation of the fibers and the type of load applied. Calculations and stiffness matrices were also developed to support the experiments and compare theory with practice. The experience demonstrated how fiber orientation, resin quality, and curing conditions influence the strength of the final composite. In conclusion, the project helped to learn and apply the complete process of fabricating and testing composite specimens, combining manual work, laboratory testing, and digital simulations. This work not only met its objectives but also provided useful knowledge for future engineering applications, especially in areas such as aerospace and structural design.

Keywords: Carbon fiber, composite materials, tensile test, ISO 527-4, mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos es fundamental para asegurar su confiabilidad en aplicaciones estructurales, entre estas propiedades, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad destacan por su relevancia en el diseño de componentes, la norma ISO 527-4:2021 establece el procedimiento para la determinación de las propiedades a tracción de materiales reforzados con fibras largas orientadas, incluyendo las condiciones de fabricación de probetas, su geometría, y requisitos para la prueba, los antecedentes muestran que la orientación de las fibras, la calidad del curado y el tipo de resina tienen un impacto directo en las propiedades finales de los compuestos (International Organization for Standardization, 2021).

Estudios previos han demostrado que incluso pequeñas variaciones en estos factores pueden modificar la resistencia y la rigidez de las piezas (Franz, Schleich and Wartzack, 2021) (Stiff, 2007) lo que hace indispensable un análisis experimental complementado con simulaciones computacionales, ahora bien, este trabajo describe el proceso de elaboración de probetas de material compuesto con fibras largas, en conformidad con dicha norma, con énfasis en el cumplimiento dimensional, control de calidad superficial y métodos de moldeo a fin de comparar los resultados ante los tipos de esfuerzos a los que son sometidas (flexión y torsión) obtenidos por pruebas reales y en simulador de uso libre se logró fabricar y analizar probetas con resultados comparables entre teoría y práctica, obteniendo experiencia en la aplicación de normas internacionales y en el uso de herramientas de simulación.

2. METODOLOGÍA

Figura 1. Metodología

Se ha demostrado que los materiales compuestos, específicamente los compuestos de fibra de carbono poseen

estas características y, por lo tanto, se utilizan con mayor frecuencia en diseños de ingeniería este trabajo de investigación, se permitió familiarizar con experiencias industriales y de laboratorio y comprender cómo factores como la dirección de las fibras, la calidad del curado o el tipo de resina influyen en el rendimiento final del material.

La investigación involucra la producción de probetas de compuesto de fibra de carbono y resina epoxica como se muestra en la figura 2, las cuales tuvieron la preparación de acuerdo con la norma ISO 527-4:2021, de manera que cumplieran con los valores requeridos respecto a las superficies de calidad externa.

Como se muestra en la Figura 2 se realizó un molde y se los cortes de acuerdo con las medidas determinadas por la norma, tipo 1ª (ver Figura 3).

Figura 2. Moldes de probetas

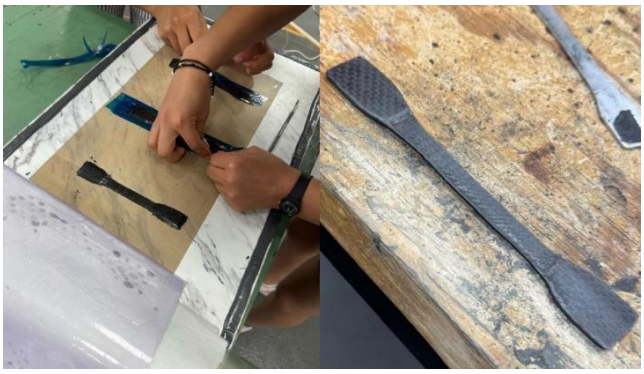


Figura 3. Probetas de fibra de carbono.

La técnica de laminado manual combinada con el embolsado al vacío ayudó a proporcionar la impregnación de las fibras y una cura homogénea (ver Figura 4). El procedimiento se utilizó para obtener especímenes con un grosor uniforme y sin defectos como burbujas o resina extraña.

Figura 4. Embolsado de vacío para curado de material compuesto.

Los materiales utilizados fueron fibra de carbono con su resina epoxica y catalizador, las películas de liberación, paños absorbentes y película de sellado elastomérico para la bolsa de vacío. El equipo aplicado incluyó el banco de tensión con dinamómetro, lámparas de curado de bastón y herramientas motorizadas con lijado para el acabado de bordes, y un calibrador digital para comprobar las dimensiones. El equipo de seguridad comprendió guantes, espátulas y recipientes de mezcla.

Posteriormente, se realizaron pruebas de tracción a nivel de laboratorio (ver Figura 5) y se obtuvieron resultados experimentales que se compararon con los computacionales realizados en el software de libre uso del comportamiento bajo tensión y flexión, por último, se prepararon formulaciones matemáticas y matrices de rigidez para comparar los resultados teóricos y los encontrados/simulados prácticamente. Este enfoque produjo un análisis completo de la respuesta mecánica, integrando resultados experimentales, simulación numérica y estándares internacionales.

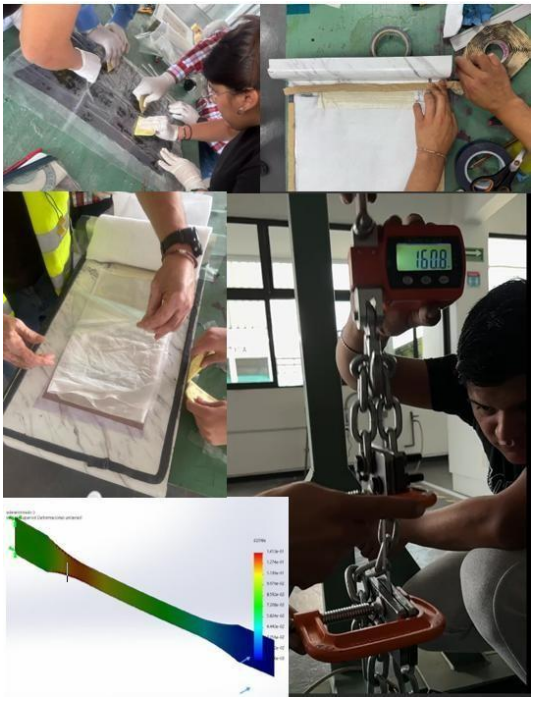


Figura 5. Nuestro proceso.

3. MARCO TEÓRICO

Materiales compuestos

Los materiales compuestos son materiales formados por la combinación de dos o más fases distintas que al integrarse, generan un sistema con propiedades superiores a las de sus componentes por separado, generalmente constan de matriz, refuerzo e interfaz como se muestra en la Figura 6 -Matriz (fase continua): mantiene unidos los refuerzos, distribuye los esfuerzos y protege al material de la corrosión o daños externos, puede ser polimérica, metálica o cerámica. -Refuerzo (fase dispersa): proporciona la mayor parte de la resistencia, rigidez y propiedades específicas, se presenta en forma de fibras, partículas o láminas.

-Interfase: región de unión entre la matriz y el refuerzo, es crítica para la transferencia de cargas y determina en gran medida el desempeño del compuesto.

Su principal ventaja es la alta relación resistencia-peso, además de resistencia a la corrosión, capacidad de diseño estructural, (orientación de fibras) y versatilidad en aplicaciones como aeronáutica, automotriz, construcción y equipos deportivos (Chawla, 2012).

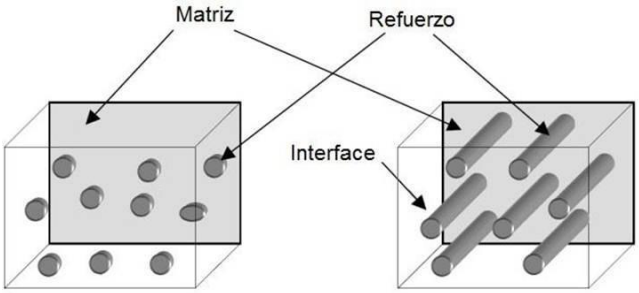


Figura 6. Combinación de elementos para el material compuesto. Ramírez Escorza, B.G. (2016) Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Clasificación de los materiales compuestos

Así como se muestra en la Figura 7, tenemos diferentes tipos de clasificación

-Compuestos con fibras: combinan dos o más materiales para crear uno nuevo

- Compuestos con copos: en este tipo de materiales, el refuerzo se incorpora en forma de láminas delgadas o copos dispersos en la matriz.

-Relleno: fibras entrelazadas que ofrecen mayor isotropía y resistencia frente a cargas multidireccionales.

-Compuestos particulados: Formados por partículas distribuidas en la matriz, mejoran la dureza, la resistencia al desgaste y la estabilidad dimensional.

-Compuestos laminados: Integrados por capas (láminas) con diferentes orientaciones. Permiten optimizar propiedades en varias direcciones y son ampliamente usados en estructuras aeroespaciales y navales (Callister and Rethwisch, 2020).

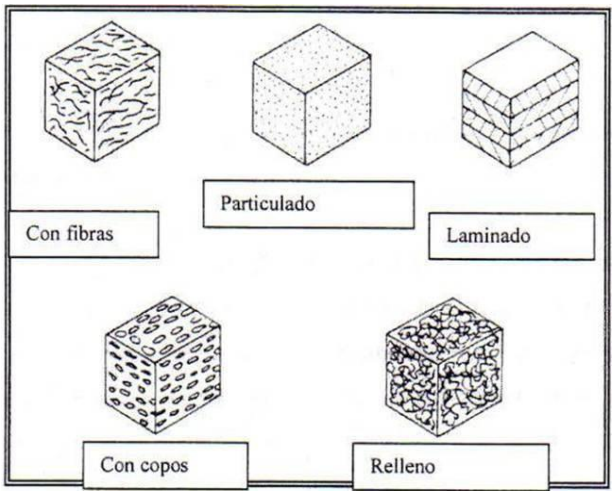


Figura 7. Clasificación de materiales compuestos. Ochsner, A. & Altenbach, H. (eds.) (2020).

Clasificación según la naturaleza de los constituyentes

Matriz polimérica (PMC – Polymer Matrix Composites): ligeros, fáciles de fabricar y los más comunes. Suelen reforzarse con fibras de vidrio, carbono o aramida.

-Matriz metálica (MMC – Metal Matrix Composites): mayor resistencia a temperatura y buena conductividad. Ejemplo: aluminio reforzado con carburo de silicio.

-Matriz cerámica (CMC – Ceramic Matrix Composites): útiles en condiciones de muy alta temperatura, aunque suelen ser más frágiles.

-Carbono-carbono: fibras y matriz de carbono, con excelente estabilidad térmica; se emplean en frenos aeronáuticos y sistemas espaciales.

Clasificación según el tamaño de la fase dispersa

-Nanocompuestos: emplean nanopartículas, nanotubos o nano láminas con pequeñas cantidades de refuerzo logran mejorar conductividad, rigidez y propiedades de barrera.

-Micro compuestos: refuerzos en el rango micrométrico, como partículas o fibras cortas. Presentan propiedades intermedias y son más fáciles de procesar.

-Macro compuestos: refuerzos como fibras continuas o laminados distinguibles a simple vista. Son los más comunes en aplicaciones estructurales donde se requiere alta resistencia mecánica (Hull and Clyne, 1996). (ver Figura 8).

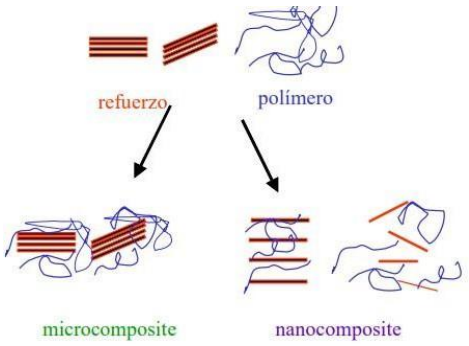


Figura 8. Fase dispersa en materiales compuestos. Hull, D. & Clyne, T.W. (1996)

4. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Esfuerzos por tensión en software de libre uso (ver Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Análisis en software de libre uso por flexión

Nombre	Tipo	Min	Máx
Tensiones 2	VON: tensión de von Mises	1.546e+07N/m^2 Nodo: 1227	1.006e+10N/m^2 Nodo: 77

Tabla 2. Análisis en software de libre uso por tensión

Nombre	Tipo	Min.	Máx.
Desplazamientos 1	URES: dezpla. resultantes	0.000e+00mm Nodo: 6	1.31e-01mm Nodo: 1

Resultados reales análisis por tensión:

El punto de ruptura de una de las probetas fue a 25.48 kg de fuerza (ver Figura 9).

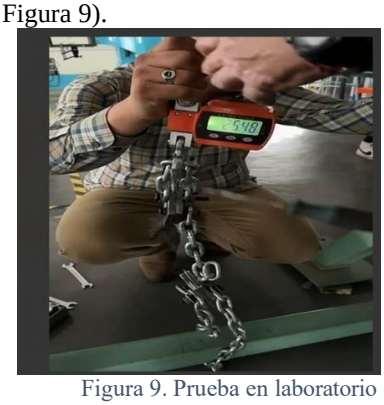


Figura 9. Prueba en laboratorio

El punto de ruptura de una de las probetas fue a 160.8 kg de fuerza (ver Figura 10).

Figura 10. Prueba en laboratorio

CÁLCULOS MATEMÁTICOS (EXCEL)

La valoración matemática que realizamos muestra el comportamiento mecánico de las probetas a base de material compuesto laminado que fabricamos, estas ecuaciones nos permiten saber su rigidez y resistencia en distintas direcciones, de acuerdo con la fibra y resina con respecto a la orientación de las capas (ver Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de rigidez

MATRIZ DE RIGIDEZ			
[Q]	2.36E+11	3.01E+09	0
	3007679181	15038395904	0
	0	0	3.00E+10
[T]	cos^2 (Θ)	sen^2 (Θ)	2sen(Θ)cos(Θ)
	sen^2 (Θ)	cos^2 (Θ)	(-)2sen(Θ)cos(Θ)
	(-) sen(Θ)cos(Θ)	sen(Θ)cos(Θ)	cos^2 (Θ) - sen^2 (Θ)
[D]'	cos^2 (Θ)	sen^2 (Θ)	(-) sen(Θ)cos(Θ)
	sen^2 (Θ)	cos^2 (Θ)	sen(Θ)cos(Θ)
	2sen(Θ)cos(Θ)	(-)2sen(Θ)cos(Θ)	cos^2 (Θ) - sen^2 (Θ)

Mostramos tablas de matrices con ángulos de 0,45,-45, y una matriz de 90, esto representan la rigidez de cada capa individual pero ya expresada en el sistema de coordenadas global del laminado. La fuerza aplicada para las capas a 0° y 90°, el término Q16 y Q26 son cero. Sin embargo, para las capas a ±45°, estos términos tienen valores significativos, esto demuestra que, para estas orientaciones, una tensión de tracción simple (en X) no solo causará un alargamiento, sino también una deformación por cizalladura (un intento de que los ángulos rectos de la probeta se deformen). Esto es crucial para entender el comportamiento complejo de los laminados (ver Tablas 4, 5, 6 y 7)

Tabla 4. Matriz 0°

MATRIZ CONSTRUIDA DE 0°			
[T]0°	1	0	0
	0	1	0
	0	0	1
[D]' 0°	1	0	0
	0	1	0
	0	0	1
[Q]0	2.36E+11	3007679181	0
	3007679181	15038395904	0
	0	0	30000000000

Tabla 5. Matriz 45°

MATRIZ CONSTRUIDA DE 45°			
[T]45°=	0.5	0.5	1
	0.5	0.5	-1
	-0.5	0.5	0
[D]' 45°=	0.5	0.5	-0.5
	0.5	0.5	0.5
	1	-1	0
[Q]45 =	3.17E+09	2.93E+09	2.04E+09
	2.93E+09	3.17E+09	2.04E+09
	2.04E+09	2.04E+09	2.15E+09

Tabla 6. Matriz 90°

MATRIZ CONSTRUIDA DE 90°			
[T]90°=	0	1	0
	1	0	0
	0	0	-1
[D]' 90° =	0	1	0
	1	0	0
	0	0	-1
[Q]90 =	1.52E+09	4.57E+08	0.00E+00
	4.57E+08	1.01E+10	0.00E+00
	0.00E+00	0.00E+00	6.00E+08

Tabla 7. Matriz -45°

MATRIZ CONSTRUIDA DE -45°			
[T]-45°=	0.5	0.5	-1
	0.5	0.5	1
	0.5	-0.5	0
[D]' -45° =	0.5	0.5	0.5
	0.5	0.5	-0.5
	-1	1	0
[Q]-45 =	3.17E+09	2.93E+09	-2.04E+09
	2.93E+09	3.17E+09	-2.04E+09
	-2.04E+09	-2.42E+09	2.15E+09

Dada la información resultó la matriz de rigidez extensional y rigidez a la flexión (ver Tabla 8).

Tabla 8. Sumatoria de matrices

SUMATORIAS			
[A] =	-2.43E+11	-9.325E+09	0
	-9.325E+09	-3.151E+10	0
	0	378000000	-4.894E+09
[B] =	-2.58E+11	-9.875E+09	0
	-9.875E+09	-3.337E+10	0
	0	400313718	-5.183E+09
[D] =	-2.59E+11	-9.91E+09	0
	-9.91E+09	-3.349E+10	0
	0	401719482	-5.201E+09

Esta sumatoria combinan las contribuciones de todas las capas el laminado para describir el comportamiento de las probetas

•[A] demuestra la rigidez global a tracción de nuestra probeta

•[B] demuestra que el laminado es simétrico, dado que tuvimos resultado 0 lo que significa que, al aplicarle una tracción, la probeta no se doblará de forma acampanada. Se deformará uniformemente.

•[D] demuestra la resistencia a la flexión del laminado. Predice qué tan rígida será la probeta cuando se someta a un esfuerzo de flexión.

5. CONCLUSIONES

La fabricación de una muestra de fibra de carbono con la técnica de moldeo al vacío, es un trabajo interesante dado que permitió observar físicamente el comportamiento del material compuesto, la implementación exitosa de este experimento dependió de los estándares ISO con respecto a la impregnación de resina.

El cumplimiento estratégico con la norma ISO 527-4 fue esencial para obtener con éxito muestras uniformes y útiles, se comprobó que la orientación de las fibras influye directamente en la rigidez y la resistencia del laminado: las capas a 0° soportan las mayores cargas axiales, mientras que las orientadas a ±45° presentan mayores deformaciones por cizallamiento, evidenciando el efecto del acoplamiento cortante propio de los compuestos anisotrópicos, por otro lado el desarrollo de estas mismas probetas en el software de uso libre permitió predecir el comportamiento del material esto fue una herramienta de apoyo útil para la estructura y simulación de cargas.

Se concluye que el objetivo se logró con la creación de probetas funcionales la combinación de ensayos experimentales, simulaciones numéricas y análisis teórico constituye un método eficaz para evaluar y comprender las propiedades estructurales de materiales compuestos.

6. REFERENCIAS.

Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. (2020) Materials science

and engineering: an introduction. 10th edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Chawla, K.K. (2012) Composite materials: science and engineering. 3rd edn. New York: Springer.

Franz, M., Schleich, B. & Wartzack, S. (2021) 'Tolerance management during the design of composite structures considering variations in design parameters', The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113, pp. 1753–1770. doi:10.1007/s00170-020-06555-5.

Hull, D. & Clyne, T.W. (1996) An introduction to composite materials. 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press.

Hull, D. & Clyne, T.W. (1996) Fase dispersa en materiales compuestos. [Figura 8].

International Organization for Standardization (ISO) (2021) ISO 527-4:2021 – Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. Geneva: ISO.

Ochsner, A. & Altenbach, H. (eds.) (2020) Clasificación de materiales compuestos. [Figura 7].

Ramírez Escorza, B.G. (2016) Combinación de elementos para el material compuesto. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). [Figura 6].

Stiff, A. (2007) Investigating the critical role of illiteracy in medical non-compliance and its impact on patient outcomes [PDF]. University of Iowa. Available at: https://beckermann.lab.uiowa.edu/sites/beckermann.lab.uiowa.edu/files/2023-10/Stiffness2007.pdf (Accessed: 27 October 2025).

Tecnogol: Fostering Ethics, Teamwork, and Love for Engineering through Competitive Robotics

Marín Amaya, Mónica Graciela; Guerrero Ávila, Yasmín; Macías de la Torre, Armando; Limones Gómez, Grecia Daniela; Cortés Reyes, Brayan Guadalupe; Moreno Álvarez, Lúar*

Instituto Tecnológico de La Laguna, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Torreón Coah. México CP 27000. Col. Centro
*(*e-mail: lmorenoa@lalaguna.tecnm.mx).*

Abstract: This paper presents the results of Tecnogol, the final project developed in the Professional Development course of the Electronic Engineering program during the January–June 2025 academic term at the Instituto Tecnológico de La Laguna (TecNM). The project consisted of designing and constructing autonomous or remotely controlled robotic vehicles capable of competing in a soccer-style tournament, where the winner is determined by the number of goals scored within a set time. Beyond its technical scope, Tecnogol aimed to foster ethics, teamwork, and a genuine love for the engineering profession through hands-on learning and collaborative problem solving. The experience allowed students to integrate their knowledge of electronics, control, and communication systems while developing professional and ethical competencies. Additionally, this paper highlights the ongoing efforts of the August–December 2025 student cohort, who —together with the Renewable Energy Student Chapter— are enhancing the project's implementation by introducing improvements in sustainability, control systems, and interdepartmental collaboration. The results demonstrate that Tecnogol successfully combines technical education with the ethical and human dimensions essential for the professional growth of future engineers.

Keywords: professional development, educational robotics, professional ethics, teamwork, robotic soccer.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo profesional de los ingenieros en formación requiere algo más que el dominio técnico de los sistemas eléctricos y electrónicos. La ética, el amor por la profesión, el trabajo colaborativo y la comprensión de las necesidades sociales son pilares esenciales para su ejercicio responsable (Beagon, 2023; Rea, 2021; Williams 2020). Bajo este supuesto, el programa de la asignatura Desarrollo Profesional de la carrera de Ingeniería Electrónica del TecNM-Instituto Tecnológico de La Laguna establece que "Ante una sociedad tan cambiante y con un proceso de globalización, es de suma importancia que el profesionista conozca el impacto de su profesión, así como la responsabilidad de desarrollarse dentro del marco legal y ético, contribuyendo de manera eficaz al logro de los retos que demanda la práctica profesional. Esta asignatura contribuye de manera definitiva a la reflexión personal del alumno sobre su formación y compromiso profesional, adquiriendo primeramente el conocimiento del quehacer del Ingeniero en Electrónica (…) y reconocer el compromiso que tiene el Ingeniero Electrónico para mantenerse actualizado en una disciplina tan cambiante, como la sociedad misma, que se exige a sí misma un mejoramiento de vida (…) Todo ello con la intención de ejercer la profesión de manera responsable, ética y dentro del marco legal en su vida profesional para beneficio de la sociedad." (TecNM, 2016)

En este contexto, la asignatura Desarrollo Profesional del programa de Ingeniería Electrónica del TecNM-Instituto Tecnológico de La Laguna impulsa el desarrollo de un proyecto final denominado "Tecnogol", consistente en la creación de carros/robots futbolistas que compiten en un torneo estudiantil, ya que este ejercicio promueve la relación directa del proyecto con las habilidades blandas y de gestión requeridas por el programa de la asignatura; además de que incentiva la aplicación de las habilidades técnicas de ingeniería y programación necesarias para la construcción de los prototipos, relacionando ambos campos de manera integral en los rubros de gestión y planificación de proyectos, trabajo en equipo y liderazgo, comunicación, resolución de problemas, pensamiento estratégico, adaptabilidad y resiliencia.

Diversos autores han señalado el impacto positivo de las competencias robóticas en la formación de ingenieros. Según Martins et al. (2016), los torneos de robótica educativa impulsan la integración de conocimientos teóricos con habilidades prácticas, promoviendo la resolución de problemas en entornos reales. Además, Farooq et al (2023) enfatiza que la robótica fomenta la ética del trabajo colectivo y el pensamiento crítico, componentes esenciales de la formación profesional moderna.

Con este proyecto, que involucra juego y creatividad, fomentamos en los estudiantes la experimentación e investigación en aplicaciones científicas y tecnológicas, que son de suma importancia para diseñar con un propósito, cooperar con sus pares y comprender cómo la ingeniería

responde a necesidades reales de innovación, recreación y servicio social, que son las habilidades blandas que se desea desarrollar en los estudiantes. El resultado esperado de este proyecto es la entrega de prototipos de carros/robots futbolistas funcionales por parte de los equipos de trabajo de la materia mencionada.

2. METODOLOGÍA

El proyecto Tecnogol se desarrolló a lo largo de dos semestres académicos dentro de la materia Desarrollo Profesional, con una población de 33 alumnos divididos en equipos interdisciplinarios de 2 a 3 personas. Cada grupo recibió el reto de diseñar, construir y programar un robot capaz de participar en un torneo de soccer robótico bajo dos posibles modalidades: autónoma (controlada por sensores y algoritmos) o semiautónoma (operada por control inalámbrico tipo Bluetooth o RF). La totalidad de los equipos de trabajo, conformados en los grupos de ambos semestres, eligió la modalidad semiautónoma.

2.1 Planeación y Diseño

Durante las primeras semanas se planificaron los equipos, definiendo los roles internos (líder técnico, diseñador, programador, gestor de materiales y relaciones públicas), y se elaboró el plan de proyecto con cronograma, presupuesto y objetivos éticos. Se fomentó la reflexión sobre el impacto social de la ingeniería, la sostenibilidad y la responsabilidad en el uso de materiales y energía.

En cuanto a la fase del diseño se puntualizaron los:

- **Requisitos del proyecto**: Se define el tamaño del carrito, el tipo de control (Bluetooth, radiofrecuencia, etc.) y la fuente de energía. También se consideran las reglas del juego y dónde se va a participar (por ejemplo, Feria de Proyectos Departamental del ITL) para realizar la competencia de robótica, como demostración del proyecto a todo el plantel educativo.

- **Diseño estructural**: Deben elaborar un boceto o un plano detallado de la estructura del carrito, que puede ser un chasis comercial o una base hecha con materiales reciclados, como cartón o plástico. El diseño debe garantizar la estabilidad y el espacio para todos los componentes.

- **Selección de componentes**: Se eligen los elementos clave, como una placa de control (por ejemplo, Arduino Nano o UNO), motores de corriente continua, un controlador de motores (puente H), una batería y un módulo de comunicación como Bluetooth.

2.2 Construcción y programación

Los robots fueron desarrollados utilizando microcontroladores Arduino UNO, Arduino Blocks o alguna otra opción visual y más sencilla como el ESP32; motores DC con reductores; sensores de proximidad ultrasónicos; describiendo el código para el debido control de motores y movimiento del carrito; esto incluye funciones básicas como avanzar, retroceder, girar a la derecha y a la izquierda, y detenerse. Se programa la comunicación con el módulo Bluetooth para que el carrito reciba y ejecute los comandos desde un dispositivo externo, como un teléfono o un control, para cargar el programa y conectarlo a la placa de control de la computadora y se cargue el código desarrollado, asegurando que se utilice el puerto de comunicación correcto.

Los alumnos documentaron el proceso de integración electrónica, el ajuste de parámetros de velocidad y la calibración de sensores.

En cuanto a la fase de construcción, el **ensamblaje del chasis** se monta a la estructura del carrito siguiendo el diseño, y si se utiliza un chasis prefabricado, simplemente se fijan los elementos según las instrucciones.

Para la **Instalación de la electrónica**, se fija la placa de control, el puente H y la porta-baterías al chasis con tornillos o pegamento; y a su vez se montan los motores en las posiciones designadas y se asegura que las ruedas encajen correctamente.

Y por último del **Cableado y conexiones**, podemos comentar que se conectará la batería al puente H para alimentar los motores, y a su vez este a la placa de control para manejar el movimiento. Posteriormente se conecta el módulo de comunicación (Bluetooth) a la placa de control para recibir comandos.

2.3 Torneo "Tecnogol"

El torneo final se llevó a cabo en las instalaciones del Departamento de Eléctrica, Electrónica, Energías Renovables y Semiconductores, en un receptáculo de madera adaptado como campo de juego con dimensiones (no estandarizadas) de 1.52 × 1.02 m (Fig.1). Cada partido tuvo una duración de 5 minutos, donde el robot ganador fue aquel que logró anotar más goles. El desempeño fue evaluado mediante una rúbrica que combinó criterios técnicos (funcionalidad, estabilidad, innovación) determinados por docentes especialistas, y valores profesionales (cooperación, ética, liderazgo) evaluados por la docente de la materia.

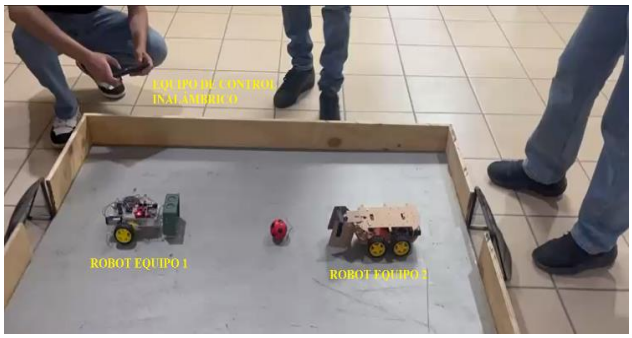


Fig. 1. Robots construidos para el proyecto "Tecnogol".

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos superaron las expectativas iniciales tanto en lo técnico como en lo formativo.

El 100 % de los equipos logró completar un prototipo funcional y participó en el torneo con éxito y entusiasmo (Fig.2), presentándose en el transcurso de proyecto solamente fallas menores relacionadas con calibración, acoplamientos de armado o interferencias electromagnéticas.

Fig. 2. Póster ilustrativo de un equipo de trabajo para el torneo "Tecnogol".

Más allá de los indicadores cuantitativos, el proyecto demostró un impacto significativo en la motivación y cohesión grupal, así como una interacción más cordial fuera del aula entre docentes y estudiantes (Fig.3). Los alumnos expresaron sentirse más identificados con su carrera, reconociendo la relevancia de la electrónica en contextos sociales y recreativos. Los testimonios recogidos en las reflexiones finales resaltaron frases como "aprendí a trabajar en equipo reforzando y mejorando mis conocimientos técnicos" y "entendí que ser ingeniero en electrónica no es solo construir los circuitos, sino además concretar proyectos colaborando con otros compañeros".

Desde una perspectiva educativa, Tecnogol contribuye al modelo de aprendizaje basado en proyectos (ABP), donde los estudiantes aprenden haciendo y reflexionando sobre su propio proceso (Kolb, 1984). La competencia amistosa sirvió como catalizador de aprendizaje significativo, al tiempo que promovió valores éticos: la honestidad en la competencia, la solidaridad con los equipos con menos recursos y la humildad ante el error técnico.

Fig. 3. Interacción grupal entre alumnos y docentes de Ingeniería en Electrónica en el torneo "Tecnogol".

Por otra parte, la experiencia de este proyecto reforzó de manera positiva el interés por esta actividad técnica en alumnos de la ingeniería en Energías Renovables, quienes se involucraron desde el capítulo estudiantil en la mejora de la infraestructura disponible (Fig.4), y en la construcción de nuevos prototipos para la participación en una nueva edición del torneo en la materia de Desarrollo Profesional, impartida en esta carrera (Fig.5).

Fig. 4. Mejoramiento de la infraestructura por parte de alumnos del capítulo estudiantil de Energías Renovables.

Estos resultados coinciden con estudios previos sobre robótica educativa, como los de Patiño-Escarcina (2021), quien señala que la robótica de competencia desarrolla habilidades blandas y técnicas simultáneamente, y con los de Martins et.al. (2016), que destacan el soccer robótico como herramienta para enseñar control, programación y colaboración bajo presión.

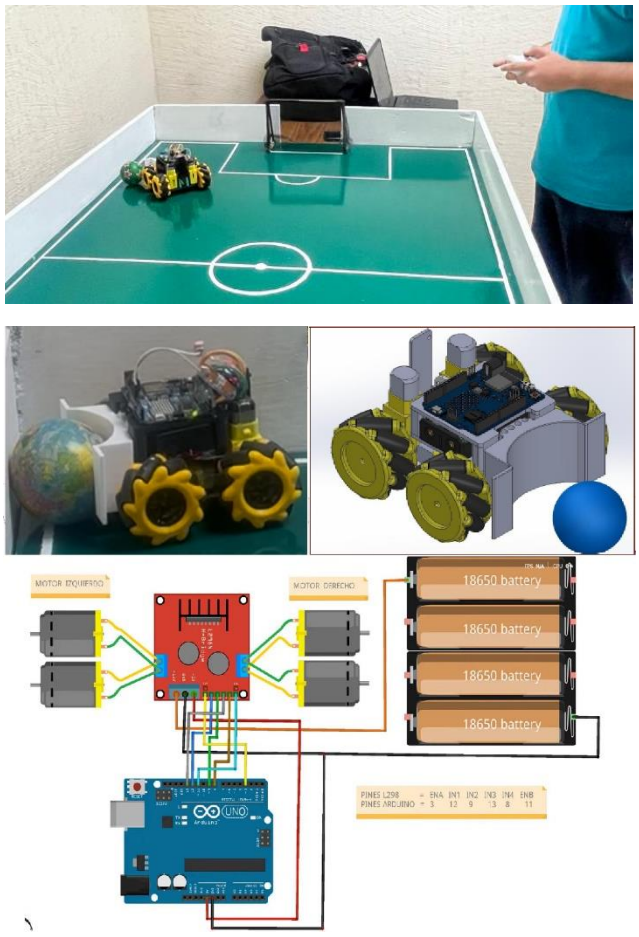


Fig. 5. Arriba: prototipo en el diseño mejorado de la cancha para la edición más reciente del proyecto "Tecnogol". Abajo: Ejemplo de prototipo y su esquema de conexiones.

4. CONCLUSIONES

El proyecto Tecnogol se consolida como una experiencia formativa integral que combina la enseñanza técnica con la formación ética y humana del ingeniero. Los estudiantes no solo adquirieron habilidades en electrónica y robótica, sino que también fortalecieron valores esenciales como el respeto, la cooperación y la responsabilidad profesional.

La robótica educativa demuestra ser un medio eficaz para cultivar el amor por la profesión, ya que permite a los alumnos experimentar el impacto directo de la ingeniería en contextos lúdicos y sociales. Además, fomenta la autonomía, la creatividad y el pensamiento crítico, competencias fundamentales para enfrentar los retos de la industria 4.0.

Se recomienda dar continuidad al torneo en futuras ediciones, incluyendo categorías de inteligencia artificial y diseño sostenible, así como la difusión interinstitucional entre campus del TecNM, con el fin de fortalecer la cultura de innovación y ética profesional en las ingenierías.

En síntesis, este proyecto fue el campo de prueba donde se aplicaron de forma práctica todas las habilidades teóricas aprendidas en la materia de Desarrollo Profesional. Mientras que del lado de la ingeniería es la herramienta para construir el objeto, el desarrollo profesional proporciona el marco para que el proyecto se desarrolle de manera exitosa y el equipo de trabajo funcione de forma eficiente.

AGRADECIMIENTOS

A los estudiantes de Ingeniería en Electrónica en la materia Desarrollo Profesional del semestre Enero-Junio y Agosto-Diciembre de 2025 en el ITL-TecNM por su entusiasta participación en las actividades del proyecto y creación de su prototipo. Al Dr. Lúar Moreno Álvarez y al Ing. José Carlos Martínez Muñoz por la donación del material para la construcción de la "cancha", y a los alumnos Grecia Daniela Limones Gómez, Brayan Cortés Reyes y Erick Ernesto Madrid Camacho por su apoyo en el mejoramiento de la "cancha" para el torneo Tecnogol.

REFERENCIAS

Beagon, U.; Bowe, B., 2023. Understanding Professional Skills in Engineering Education: A Phenomenographic Study of Faculty Conceptions. Journal of Engineering Education, 112(4), pp.1109-1144

Farooq, A.; Zukhraf, S. Z. N.; Maryam, H.; Attard, C. & Kamal M., 2023. Exploring the Impact of Robotics in STEM Education Activities and Competitive Challenges, 2023 IEEE International Conference on Cybernetics and Innovations (ICCI), phetchaburi, Thailand, pp. 1-6.

Kolb, D.A., 1984. Experiential learning: Experience as the source of learning and development. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Martins, F.N., Gomes, I.S. & Santos, C.R.F., 2016. RoSoS – a free and open-source robot soccer simulator for educational robotics. In: F. Santos Osório & R. Sales Gonçalves (eds), Robotics – 12th Latin American Robotics Symposium and Third Brazilian Symposium on Robotics, LARS 2015/SBR 2015, Revised Selected Papers. Communications in Computer and Information Science, vol. 619, pp. 87-102

Patiño-Escarcina R.E.; Barrios-Aranibar, D.; Bernedo-Flores, L.S.; Alsina, P.J. & Gonçalves, L.M.G.. 2021. A Methodological Approach to the Learning of Robotics with EDUROSC-Kids. J Intell Robot Syst. 102(2):34.

Rea, S.; Zhu, Q.; Nieusma, D.; Shiekh, K.; Williams, T., 2021. Cultivating ethical engineers in the age of AI and robotics: an educational cultures perspective. Conference: IEEE International Symposium on Technology and Society-January 2021.

TecNM: Secretaría Académica, de Investigación e Innovación. Dirección de Docencia e Innovación Educativa, 2016. Programa de la Asignatura de Desarrollo Profesional AEO-1388.

Williams, T.; Zhu, Q.; Grollman, D. 2020. An experimental ethics approach to robot ethics education. The Tenth AAAI Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence (EAAI-20). pp 13485-13492

Advances in Hybrid Wind-Solar Photovoltaic Systems: A Short Review

López Barreto, Andrea-Alejandra *, García Morales, Jarniel *, Reyes Reyes, Juan *, Cervantes Bobadilla, Marisol *, Astorga Zaragoza, Carlos-Manuel *

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*
(e-mail: {m25ce029, jarniel.gm, juan.rr, marisol.cb, carlos.az}@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: The global energy transition is increasingly driven by solar photovoltaic and wind technologies. However, the intermittent nature of these technologies poses a major challenge to grid stability and supply reliability. Hybrid wind-solar energy systems offer a promising solution by leveraging the natural complementarity between wind and solar resources to deliver a more stable and continuous power output. This paper reviews recent advancements in hybrid systems with the objective of analyzing and classifying research into three main areas: 1) the viability of conventional architectures; 2) advances in control, management, and optimization of systems; and 3) the trend of the direct physical integration of components. The methodology involves synthesizing key findings from studies and identifying research gaps. The results indicate that the feasibility of conventional systems (with physically separate components) is well established, and that substantial progress has been made in intelligent control algorithms. However, the analysis reveals a significant research frontier in the direct physical integration of generation units. This innovative approach remains in its early stages, with a notable lack of experimental validation and scalability assessments. The review concludes by emphasizing this gap and underlining the need for future work in multiphysics modeling and experimental prototyping.

Keywords: Hybrid renewable energy, wind system, photovoltaic system, energy production.

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética hacia un futuro menos dependiente de los combustibles fósiles, motivada por enfrentar el cambio climático y fortalecer la seguridad energética, ha posicionado a las fuentes renovables en el centro del desarrollo tecnológico. Durante las últimas décadas, se han consolidado progresivamente como una parte fundamental de la generación eléctrica.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, del inglés: International Renewable Energy Agency), la capacidad instalada a nivel mundial creció un 15.1% en 2024, añadiendo 585 GW, de los cuales las renovables representaron un récord del 92.5%. La energía solar fotovoltaica y la eólica se consolidan como las tecnologías dominantes, representando el 77% y 19% de la nueva capacidad, respectivamente (IRENA, 2025). En México, la participación de energías limpias en la generación total alcanzó un 26.5% en el primer semestre de 2023, donde la energía fotovoltaica (32.8%) y la eoloeléctrica (27.6%) lideran la contribución renovable (Secretaría de Energía, 2024).

Es fundamental considerar la naturaleza de los recursos naturales que alimentan estas tecnologías, lo cual representa un desafío debido a la intermitencia ocasionada por la variabilidad climática. La energía fotovoltaica depende del ciclo diurno, mientras que la eólica del viento fluctuante; factores que inciden en la estabilidad del suministro eléctrico, el cual se ve comprometido bajo estas condiciones.

Para abordar estos desafíos, se han desarrollado sistemas híbridos que combinan la energía eólica con la solar fotovoltaica. De esta manera, se aprovecha la complementariedad de ambos recursos, como la alta disponibilidad del sol durante el día y vientos mayores que ocurren comúnmente en periodos nocturnos o nublados, con el propósito de disminuir las oscilaciones y obtener un flujo de energía más constante. No obstante, la viabilidad de la configuración híbrida depende de los avances en su diseño, control y validación para escalarlos a aplicaciones reales.

El presente artículo tiene por objetivo realizar una revisión del estado del arte sobre los avances de los sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos en los últimos cinco años. Para ello, se exploraron bases de datos científicas con la finalidad de identificar los estudios que abordan la integración de los componentes en diferentes líneas de investigación, y examinar la capacidad de respuesta de los sistemas ante las condiciones climáticas, así como la tendencia tecnológica.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección, se desarrollan los conceptos fundamentales para la comprensión del contenido técnico del estudio.

2.1 Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico (FV) transforma la energía solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Este fenómeno ocurre en las células solares, compuestas por materiales semiconductores (generalmente silicio) dopados para crear una unión p-n. Cuando los fotones de la luz solar inciden sobre la célula, excitan los electrones, generando pares electrón-hueco que crean una diferencia de potencial y un flujo de corriente continua (CC) (Alfonso, 2025).

Componentes: Paneles solares, inversor (convierte CC en CA), sistema de montaje, y en sistemas autónomos (off-grid), un regulador de carga y baterías. Los sistemas conectados a red (on-grid) utilizan la red como respaldo.

Modelo matemático básico

El comportamiento eléctrico de una célula o panel fotovoltaico se describe fundamentalmente mediante el modelo de circuito equivalente de un solo diodo. Este modelo representa la célula como una fuente de corriente en paralelo con un diodo y resistencias que modelan las pérdidas internas. La relación entre la corriente de salida (I) y el voltaje (V) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_O \left[exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Donde la corriente de salida (I) es el resultado de la fotocorriente generada por la luz (I_L) menos las pérdidas por recombinación en el diodo y las pérdidas a través de las resistencias en serie (R_s) y en paralelo (R_{sh}).

Parámetros

I_L $Fotocorriente\ (A)$
I_O $Corriente\ de\ saturación\ del\ diodo\ (A)$
R_s $Resistencia\ en\ serie\ (\Omega)$
R_{sh} $Resistencia\ en\ paralelo\ (\Omega)$
n $Factor\ de\ idealidad\ del\ diodo$
V_T $Voltaje\ térmico\ (V)$

2.2 Sistema eólico

Un sistema eólico convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. El principio fundamental es la interacción aerodinámica de las palas del aerogenerador con el flujo de aire, generando una fuerza de sustentación que provoca la rotación del rotor. La potencia extraíble está limitada por el Límite de Betz (eficiencia máxima teórica del 59.3%).

Tipos de Aerogeneradores:

Eje Horizontal (HAWT): Cuentan con tres o más palas unidas a un eje de rotación paralelo al suelo, lo que hace que las palas giren en un plano perpendicular al mismo (Iberdrola, 2025).

Eje Vertical (VAWT): El eje de rotación es perpendicular al suelo, lo que significa que las palas giran en un plano paralelo al mismo. Al no necesitar reorientarse en función de la dirección del viento son turbinas más versátiles, además de más fáciles de mantener y de integrar en entornos urbanos gracias a su menor tamaño y necesidad de altura (Iberdrola, 2025).

Modelo matemático básico

La potencia disponible en el viento que atraviesa el área de barrido de un aerogenerador se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} pAv^3$$

La potencia mecánica que la turbina puede extraer del viento se determina introduciendo el coeficiente de potencia (C_p), que representa la eficiencia aerodinámica del rotor.

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} pAv^3 C_p(\lambda, \beta)$$

El coeficiente C_p es una función no lineal de la velocidad de punta (TSR o λ) y del ángulo de paso de las palas (β), y su valor máximo teórico es el Límite de Betz $(C_{pmax} \approx 0.593)$.

Parámetros

p $Densidad\ del\ aire\ \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
A $Área\ de\ barrido\ del\ rotor\ (m^2)$
v $Velocidad\ del\ viento\ \left(\frac{m}{s}\right)$
C_p $Coeficiente\ de\ potencia\ (adimensional)$

2.3 Sistema híbrido

Un sistema de energía renovable híbrida consta de dos o más fuentes de energía renovable, como turbinas eólicas y sistemas fotovoltaicos, utilizadas conjuntamente para proporcionar una mayor eficiencia del sistema y una mayor estabilidad en el suministro de energía (Roy et al., 2022).

El sistema híbrido de energía eólica y solar incorpora tecnologías eólicas y solares para producir energía eléctrica. Debido a la complementariedad de las energías, el sistema híbrido ofrece varias ventajas sobre la tecnología que opera por separado (Roy et al., 2022).

3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

El estado del arte analiza las investigaciones recientes sobre la combinación de tecnologías eólica y solar fotovoltaica en sistemas híbridos. La búsqueda se efectuó en distintas bases de datos, centrándose en los avances de los sistemas híbridos convencionales, estrategias de optimización e integración física de los componentes.

El análisis de la literatura revela tres corrientes principales de investigación: 1) la evaluación de arquitecturas de sistemas híbridos convencionales, 2) el desarrollo de estrategias de control y optimización, y 3) la exploración de diseños con integración física de componentes.

3.1 Sistemas híbridos convencionales

La corriente de investigación predominante en el campo de los sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos está centrada en la validación tecno-económica de arquitecturas convencionales, caracterizadas por la separación física de los componentes. Esta parte corrobora la viabilidad de los sistemas aplicados en diversas zonas geográficas, tanto conectadas a la red (on-grid) como fuera de ella (off-grid).

En este contexto, el trabajo de Sánchez-Torres et al. (2019), quienes evaluaron un sistema on-grid para recarga de autobuses eléctricos, confirma que la combinación de las tecnologías es capaz de cumplir los requerimientos de energía. Asimismo, Kebbati et al. (2022), mediante simulaciones, validaron la capacidad de los sistemas para cubrir parte del consumo en una región de Argelia, sin embargo, destacan que su desempeño depende de la variabilidad climática.

Por otro lado, el estudio de Aranguri et al. (2021) efectuó el análisis de datos reales, donde se demostró de manera experimental que la configuración híbrida mejora la estabilidad y confiabilidad del sistema off-grid. La investigación realizada por Pop et al. (2023), a través de la experimentación, establece nuevamente que los sistemas híbridos tienen la capacidad de cubrir la demanda, en este caso, de entornos domésticos en Rumanía.

Dentro de las aplicaciones se encuentran los sistemas en azoteas de edificios urbanos (Ge et al., 2022), o en zonas costeras (Islam et al., 2024), escenarios donde se observa la notable mejora en la estabilidad y autosuficiencia energética. No obstante, se sigue presentando la dependencia del recurso renovable.

Finalmente, la influencia climatológica local se ejemplifica en el estudio de Ghayoor et al. (2021) en Durban; su análisis concluyó que la baja velocidad del viento en la región comprometía la viabilidad eólica, posicionando a la fotovoltaica como la opción técnica más rentable.

Tabla 1. Resumen de estudios sobre sistemas híbridos convencionales. Elaboración propia.

Autor(es) y año	Enfoque principal	Metodología	Conclusión
Sánchez et al. (2019)	Sistema on-grid para recarga de autobuses	Simulación	La demanda energética de la flota puede ser satisfecha
Kebbati et al. (2022)	Sistema on-grid en Adrar, Argelia	Simulación (HOMER)	Cubre gran parte del suministro
Aranguri et al. (2021)	Sistema off-grid universitario	Datos reales	Mejora la estabilidad y confiabilidad del suministro
Pop et al. (2023)	Sistema off-grid para consumo doméstico	Experimentación	Cubre entre el 42% y el 53% de la demanda
Ge et al. (2022)	Sistemas en azoteas urbanas	Modelado	Aumenta la autosuficiencia energética del edificio
Islam et al. (2024)	Diseño para zona costera	Simulación (HOMER)	Viable con bajo costo de energía (LCOE)
Ghayoor et al. (2021)	Sistema on-grid en Durban	Simulación	La baja velocidad del viento local limita la viabilidad eólica

3.2 Avances en control, gestión y optimización

En otra línea de investigación, se encuentra la gestión y control para la eficiencia de los sistemas híbridos, lo cual se evidencia en las investigaciones realizadas. En este ámbito, Roy et al. (2022), presentaron una revisión bibliográfica sobre el modelado y algoritmos de optimización de los sistemas, plasmando que el almacenamiento es clave para la confiabilidad de la configuración híbrida. La relevancia de la optimización es demostrada por Jha et al. (2022), cuyo sistema simulado para la India redujo los costos hasta en un 20%, evidenciando la eficiencia y continuidad del suministro.

Por la parte de control, propusieron una estrategia de frecuencia que logró reducir las fluctuaciones hasta en un 95%, mediante la modulación de la potencia fotovoltaica en función de la velocidad de las turbinas, lo cual representa un avance significativo para la estabilidad de la red (Fernández et al., 2020). Asimismo, Rama et al. (2024), destacaron la eficiencia de los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para maximizar la captación de energía durante los ciclos diurnos.

Tabla 2. Resumen de estudios sobre avances en control, gestión y optimización. Elaboración propia.

Autor(es) y año	Enfoque principal	Metodología	Conclusión
Roy et al. (2022)	Revisión de modelado y algoritmos	Revisión bibliográfica	El almacenamiento y la optimización son clave
Jha et al. (2022)	Sistema integrado a la red en la India	Simulación	Reducción de costos de hasta un 20%
Fernández et al. (2020)	Estrategia de control de frecuencia	Simulación (Simulink)	Reduce fluctuaciones de frecuencia en 95%
Rama et al. (2024)	Análisis del algoritmo MPPT	Simulación (Simulink)	MPPT es crucial para maximizar la generación

3.3 Integración física de componentes

Gran parte de las investigaciones sobre los sistemas híbridos evidencian un predominio de la segmentación espacial de sus componentes. Sin embargo, empiezan a tomar relevancia los estudios sobre la integración física directa de los componentes fotovoltaicos y eólicos en una única estructura. El objetivo es desarrollar sistemas más compactos y eficientes, optimizando el aprovechamiento del área en lugares reducidos como techos urbanos o infraestructuras limitadas.

Un estudio claro es el desarrollado por Cuahuey et al. (2023), quienes crearon un prototipo que integra el panel solar en la parte superior de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius (véase Figura 1). La turbina eólica funciona como soporte principal para el sistema fotovoltaico, eliminando la necesidad de estructuras separadas para el montaje.

El estudio reportó que la eficiencia del aerogenerador cumplió lo esperado y, principalmente, demostró la viabilidad técnica del diseño, validando que la integración de las tecnologías en un sistema unificado es funcional.

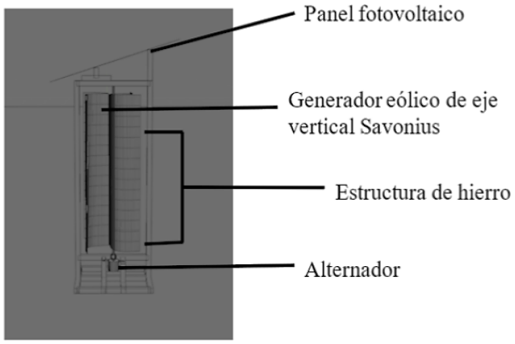


Fig. 1. Perfil del modelo de sistema híbrido (Blender). Fuente: Cuahuey et al. (2023).

Finalmente, con el análisis de Collins et al. (2025), se refuerza la premisa de que la implementación de sistemas híbridos para redes comunitarias es una solución sostenible. El estudio destaca que, además de optimizar la gestión de carga eficazmente por la complementariedad de los recursos, estos requieren un mantenimiento menor y garantizan un suministro de energía más estable. Por lo tanto, estas ventajas ayudan a fortalecer la resiliencia energética en las comunidades locales.

Tabla 3. Resumen de estudios sobre integración física de componentes. Elaboración propia.

Autor(es) y año	Tipo de integración	Metodología	Conclusión
Cuahuey et al. (2023)	Panel solar sobre aerogenerador Savonius	Prototipo	Demuestra viabilidad técnica de la estructura compartida
Collins et al. (2025)	Análisis para redes comunitarias	Análisis conceptual	Solución eficiente que promueve la independencia energética

4. CONCLUSIONES

La literatura confirma que los sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos mejoran la estabilidad y confiabilidad del suministro energético. El análisis del estado del arte revela una evolución en la investigación, que ha transitado desde los sistemas convencionales hacia una fase con optimizaciones que busca soluciones más robustas. Sin embargo, se evidencia que la innovación sobre integración física a nivel de componente, la cual busca fusionar las tecnologías en una única estructura, es también la menos efectuada.

En este contexto, la investigación sobre sistemas con componentes físicamente integrados se expone como un campo de estudio menos explorado. Mientras que la optimización de sistemas convencionales es mayor, los trabajos que abordan el diseño, modelado y, sobre todo, la validación experimental de unidades híbridas integradas, son notablemente escasos. El principal desafío en este campo involucra la interacción entre ambos componentes, de tal manera que la generación eléctrica logre satisfacer la demanda de la misma. La falta de modelos validados y de datos experimentales rigurosos, sigue siendo la principal barrera que impide que estos diseños se desarrollen más allá de la fase teórica.

México y Latinoamérica comienzan a alinearse a esta nueva línea de investigación, sin embargo, todavía falta consolidar los conocimientos en aplicaciones reales, ya que presentan un gran potencial por los recursos renovables que poseen. Además, es de interés implementar estos sistemas en zonas rurales o urbanas con espacio limitado. Esto representa una oportunidad y necesidad para la sociedad científica, creando sistemas híbridos que ayuden a fortalecer la seguridad energética y que otorgue beneficios a las comunidades con menor acceso a la red eléctrica.

Por lo tanto, este artículo busca analizar y consolidar el conocimiento sobre estos diseños, plasmando la existencia de la brecha en la investigación de este campo, que progresivamente va en aumento. Es imperativo que la investigación futura se oriente hacia la validación empírica y el desarrollo de herramientas que aborden los desafíos persistentes de estas tecnologías, para que se materialice y se alcance el potencial de los sistemas híbridos integrados.

REFERENCIAS

Alfonso, J. (2025). *Sistemas fotovoltaicos*. SunFields. Recuperado el 20 de marzo de 2025, https://www.sfe-solar.com/

Aranguri-Cayetano, D. J., Solis-Alberca, A. M. y Sáenz-Gutiérrez, R. J. (2021). Caracterización y evaluación de potencia y eficiencia de un sistema híbrido eólico fotovoltaico off-grid. *Tecnohumanismo*, 1(2), pp. 145–163. Recuperado el 20 de marzo de 2025, https://doi.org/10.53673/th.v1i9.56

Collins, N. N., Ujah, C. O., Kallon, D. V. V. and Aigbodion, V. S. (2025). Integrating solar and wind energy into the electricity grid for improved power accessibility. *Unconventional Resources*, 5, 100129. Recuperado el 20 de marzo de 2025, https://doi.org/10.1016/j.uncres.2024.100129

Cuahuey-Guerrero, M. E., Méndez, J. F., Peralta-Sánchez, E., Cardeña-Moreno, S. A. and Hernández-Sánchez, D. E. (2023). Prototipo de un sistema híbrido de energía fotovoltaica eólica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), pp. 7207-7224. Recuperado el 20 de marzo de 2025, https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5863

Fernández-Guillamón, A., Martínez-Lucas, G., Molina-García, Á. y Sarasua, J.-I. (2020). Estrategia híbrida de control de frecuencia eólica-fotovoltaica bajo condiciones climáticas variables en sistemas eléctricos aislados. *Sustainability*, 12(18), 7750. Recuperado el 25 de marzo de 2025, https://doi.org/10.3390/su12187750

Ge, J., Shen, C., Zhao, K. and Lv, G. (2022). Energy production features of rooftop hybrid photovoltaic–wind system and matching analysis with building energy use. *Energy Conversion and Management*, 258, 115485. Recuperado el 25 de marzo de 2025, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115485

Ghayoor, F., Swanson, A. G. and Sibanda, H. (2021). Optimal sizing for a grid-connected hybrid renewable energy system: a case study of the residential sector in Durban, South Africa. *Journal of Energy in Southern Africa*, 32(4), pp. 11-27. Recuperado el 25 de marzo de 2025, https://doi.org/10.17159/2413-3051/2021/v32i4a10356

Iberdrola. (2025). *Energía eólica*. Recuperado el 15 de marzo de 2025, https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-terrestre/que-son-aerogeneradores

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2025). Renewable capacity statistics 2025. Abu Dhabi. Recuperado el 15 de abril de 2025.

Islam, M. A., Ali, M. M. N., Al Mamun, A., Hossain, M. S., Maruf, M. H. and Shihavuddin, A. S. M. (2024). Optimizing energy solutions: a techno-economic analysis of solar-wind hybrid power generation in the coastal regions of Bangladesh. *Energy Conversion and Management: X*, 22, 100605. Recuperado el 15 de marzo de 2025, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100605

Jha, N., Prashar, D., Rashid, M., Khanam, Z., Nagpal, A., AlGhamdi, A. S. and Alshamrani, S. S. (2022). Energy-efficient hybrid power system model based on solar and wind energy for integrated grids. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, Article ID 4877422. Recuperado el 15 de marzo de 2025, https://doi.org/10.1155/2022/4877422

Kebbati, Y. and Baghli, L. (2022). Diseño, modelado y control de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico conectado a la red para la región de Adrar, Argelia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, pp. 6531–6558. Recuperado el 02 de abril de 2025, https://doi.org/10.1007/s13762-022-04426-y

Pop, T., Ungureanu, C., Pentiuc, R. D., Afanasov, C., Ifrim, V. C., Atănăsoae, P. and Milici, L. D. (2023). Off-grid hybrid renewable energy system operation in different scenarios for household consumers. *Energies*, 16(7), 2992. Recuperado el 25 de marzo de 2025, https://doi.org/10.3390/en16072992

Rama Krishna, A., Vijay Kumar, A., Gopala Krushna, A., Shanmugapriyan, J. and Keertana, C. (2024). The study of solar and wind power systems under different weather conditions. *E3S Web of Conferences*, 547, 03009. Recuperado el 05 de abril de 2025, https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454703009

Roy, P., He, J., Zhao, T. and Singh, Y. V. (2022). Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: a review. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 3, pp. 81–104. Recuperado el 05 de abril de 2025, https://doi.org/10.1109/OJIES.2022.3144093

Sánchez-Rucobo y Huerdo, C., Allende-Arandía, M. E., Figueroa-Espinoza, B., García-Caballero, E., Esparza, A. C.-R. and Appendini, C. M. (2023). Hybrid renewable energy system for Terminos Lagoon, Campeche, Mexico. *Energies*, 16(10), 3972. Recuperado el 16 de marzo de 2025, https://doi.org/10.3390/en16103972

Sánchez-Torres, Y., Sarmiento-Sera, A., Morales-Salas, J. and Masip-Macía, Y. (2019). Evaluación de una estación eólica-fotovoltaica conectada a la red para recargar ómnibus eléctricos. *Ingeniería Mecánica*, 22(3), pp. 127-132. Recuperado el 16 de marzo de 2025, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442019000300127&lng=es&nrm=iso

Secretaría de Energía. (2024). Reporte de Avance de Energías Limpias 2024. Gobierno de México. Recuperado el 16 de marzo de 2025, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/927403/RAEL.pdf

A Unified Analytical Framework for the Preliminary Design of Small-Scale Archimedes Screw Turbines

Aguilar Alvarez, Angel Alfredo*, Carrasco García, José*, Rosado-Tamariz, Erik*, Chagolla-Aranda, Miguel Angel*.

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira 62490, Cuernavaca, México.*

m24ce081@cenidet.tecnm.mx, erik.rt@cenidet.tecnm.mx.

Abstract: The present study proposes a unified analytical framework for defining the key geometric parameters required in the preliminary design of small-scale Archimedes Screw Turbines (ASTs) intended for low-head hydropower applications. The objective is to establish a coherent and reproducible procedure that determines the fundamental proportions of the turbine before computational or experimental evaluation. Based on a previously developed analytical formulation, a set of mathematical relationships was derived to calculate the outer and inner diameters, screw pitch, inclination angle, and hydraulic head. The proposed framework integrates several complementary elements: analytical equations with well-defined variables and units, a geometric representation of the helical system to visualize spatial constraints, a comprehensive table summarizing symbols and parameter ranges, and a step-by-step flowchart describing the calculation sequence and key design assumptions. This framework not only establishes consistent numerical relationships among the principal design variables but also serves as a foundation for three-dimensional CAD modeling and CFD configuration. The analysis highlights the interdependence of design parameters, showing how variations in one geometric feature affect the overall hydraulic performance. The results demonstrate that the proposed theoretical scheme provides a structured and flexible basis for the preliminary definition of AST geometry, reducing uncertainties during modeling and validation. Consequently, this work contributes to the standardization of design methodologies for small-scale hydropower systems and offers practical guidelines for researchers and engineers aiming to enhance the performance and applicability of ASTs under real operating conditions.

Keywords: Archimedes Screw Turbine, Small Hydropower, Turbine Parameters, Design Framework

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial ha incrementado la demanda de electricidad. Para satisfacer esta necesidad sin recurrir a los combustibles fósiles, se han buscado fuentes de energía más limpias. En este contexto, las energías renovables, que provienen de recursos naturales como el viento, el sol y el agua, se presentan como una alternativa viable debido a su amplia disponibilidad, ya que están presentes en casi todo el planeta (F. Gonzáles Gonzales et al., 2024).

El aprovechamiento de la energía hidráulica a pequeña escala representa una alternativa sustentable para la generación distribuida de electricidad. Diversos estudios como el desarrollo por Thakur et al. (R. Thakur et al., 2024) han demostrado que las turbinas tornillo de Arquímedes (AST, por sus siglas en inglés) presentan ventajas técnicas y ambientales significativas frente a las turbinas hidráulicas convencionales. Entre estas ventajas destacan su facilidad de construcción, bajo costo de mantenimiento, capacidad de funcionamiento en diferentes condiciones de operación, así como su reducida huella ecológica y compatibilidad con la fauna acuática. Asimismo, los autores que han estudiado este tipo de turbinas reportan eficiencias comprendidas entre el 72% y el 90% para cargas hidráulicas menores a 10 m, lo que evidencia su potencial como una alternativa viable para aplicaciones mini, micro y pico-hidroeléctricas.

En la literatura se han propuesto diversos métodos para estimar las dimensiones geométricas de la turbina. Rorres (C. Rorres, 2000) desarrolló un modelo analítico basado en proporciones geométricas derivadas del flujo de entrada. Posteriormente, autores como Yoosefdoost y Lubitz (A. Yoosefdoost and W. David Lubitz, 2021) ampliaron este enfoque al considerar relaciones entre el paso, el caudal y la carga hidráulica. Por su parte, Dragomirescu (A. Dragomirescu, 2021) formuló expresiones matemáticas para determinar el diámetro exterior a partir de condiciones hidráulicas específicas. En la actualidad, diversos autores (Uniyal, Karn and Singh, 2025) (Villanueva et al., 2025) continúan empleando las expresiones matemáticas desarrolladas por los investigadores que sentaron las bases para el análisis y evaluación del rendimiento de las turbinas AST. Sin embargo, ninguno de estos trabajos presenta un procedimiento formal para el diseño geométrico completo de la turbina.

Aunque existen múltiples estudios sobre el rendimiento de las turbinas AST, ninguno presenta una descripción integral de los parámetros geométricos, lo que genera ambigüedad en el desarrollo matemático del diseño. En este estudio, se propone una secuencia lógica y coherente que permite determinar los

principales parámetros geométricos de diseño. Con base en lo anterior, el presente trabajo se desarrolla a partir de una metodología unificada de diseño, la cual permite definir los parámetros fundamentales de una turbina AST de pequeña escala, con el propósito de establecer una guía estructurada para futuras modelaciones, tanto computacionales como experimentales.

2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en este trabajo se fundamenta en el análisis teórico y numérico de los parámetros geométricos que determinan la forma y el funcionamiento de una turbina AST. El procedimiento se estructura en las siguientes etapas:

2.1 Turbina tornillo de Arquímedes

Las turbinas AST están compuestas por una hélice de forma helicoidal montada sobre un eje dentro de un cilindro. Su principio de funcionamiento se basa en la entrada de agua por la parte superior del sistema, la cual fluye descendiendo a través del espacio entre el cilindro y las hélices, para finalmente salir por la parte inferior. Durante este proceso, actúan principalmente dos fenómenos físicos: la gravedad y la diferencia de presión hidrostática. Estas fuerzas generan el movimiento rotacional de la turbina sobre su propio eje, impulsada por el empuje o impacto del agua sobre las hélices (S. Christopher Simmons y W. David Lubitz, 2021).

2.2 Definición de parámetros

Los parámetros geométricos de un tornillo de Arquímedes se clasifican en dos categorías: externos e internos. Los parámetros externos incluyen el diámetro del cilindro exterior del tornillo, mientras que los internos comprenden el diámetro del eje interior, el paso (distancia entre hélices consecutivas) y el número de hélices helicoidales.

A continuación, en la Fig. 1 se muestra una representación esquemática del diseño de una turbina AST con sus respectivos parámetros geométricos. Asimismo, en la Tabla 1 se presentan con los identificadores correspondientes a cada uno de estos parámetros (F. Gonzáles Gonzáles et al., 2024).

Tabla 1. Identificadores de los parámetros geométricos de una turbina AST.

Parámetros	Descripción
L (m)	Longitud total del tornillo.
P (m)	Paso o avance del tornillo (distancia a lo largo del eje para un giro completo en el plano helicoidal).
Θ (°)	Ángulo de inclinación del tornillo.
D_o (m)	Diámetro exterior del tornillo.
D_i (m)	Diámetro interior del tornillo.
α (°)	Ángulo de inclinación de la hélice.
N	Número de hélices helicoidales.
H (m)	Carga hidráulica.
G_w (m)	Brecha entre el caudal y el tornillo.

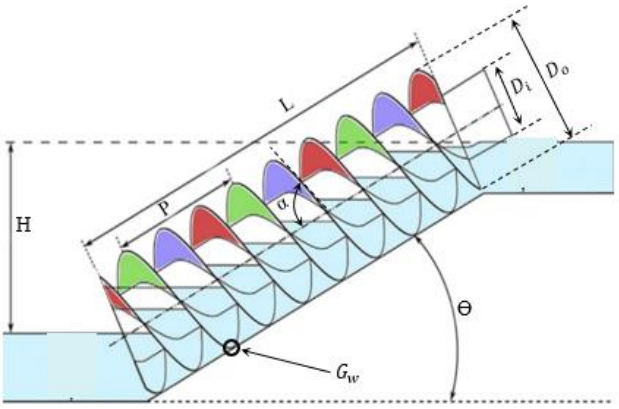


Fig. 1. Parámetros geométricos para la definición y diseño de una turbina AST (G. Dellinger et al., 2019).

2.3 Parámetros principales

El diseño de la turbina tipo tornillo de Arquímedes se fundamenta en ecuaciones analíticas desarrolladas por los autores mencionados anteriormente, las cuales describen la relación entre el caudal, la carga hidráulica y las dimensiones geométricas principales del tornillo. En particular, el diámetro exterior (Do) se determina a partir de expresiones empíricas dependientes del caudal y la carga hidráulica.

$$D_o = 0.2 \times Q + 2.2 \quad (1)$$

$$D_o = \phi^{-3/7} \times Q^{3/7} \quad (2)$$

$$D_o = \lambda(\gamma \times Q \times H)^{\psi} \quad (3)$$

$$D_o = 2\left(\frac{Q \times \tan(\theta)}{K1 \times \lambda\nu}\right)^{3/7} \quad (4)$$

Donde:

- Q: Caudal (m^3/s).
- ϕ: Constante geométrica que representa la relación entre el tornillo y el nivel de llenado ($m^{2/3}s^{-1}$).
- λ: Constante asociada al paso óptimo de la hélice.
- γ: Peso específico del agua (N/m^3).
- Ψ: Función que relaciona la potencia generada con el diámetro exterior del tornillo.
- λν: Constante relacionada tanto con el paso óptimo como con el volumen total por ciclo del tornillo.
- K1: Constante de diseño que varía entre 10.362 y 11.606.

El diámetro interior (Di) se expresa como una fracción del diámetro exterior (Do), en función del número de hélices:

$$D_i = o \times D_o \quad (5)$$

Donde:

- o es la relación óptima entre radios, cuyo valor depende del número de hélices helicoidales que conforman la turbina. Estos valores pueden consultarse en la Tabla 2 del trabajo de Rorres.

Tabla 2. Valores de la relación óptima del tornillo de Arquímedes (o) en función del número de hélices helicoidales, según Rorres.

Número de hélices [N]	Relación óptima de radios [o]	Relación óptima del paso [λ]	Relación óptima de volumen por giro [λν]	Relación óptima de volumen [ν]
1	0.5358	0.1285	0.0361	0.2811
2	0.5369	0.1863	0.0512	0.2747
3	0.5357	0.2217	0.0598	0.2697
4	0.5353	0.2456	0.0655	0.2667
5	0.5352	0.2630	0.0696	0.2647
6	0.5353	0.2763	0.0727	0.2631
7	0.5354	0.2869	0.0752	0.2619
8	0.5354	0.2957	0.0771	0.2609
9	0.5356	0.3029	0.0788	0.2601

Continuando con el diseño geométrico de la turbina, la pendiente del tornillo (K) se define como la relación entre el avance axial y la trayectoria helicoidal en una vuelta completa. Esta relación se determina mediante la tangente del ángulo de inclinación (θ), y se expresa matemáticamente como:

$$K = \tan(\theta) \quad (6)$$

La determinación del paso del tornillo (P) depende significativamente del ángulo de inclinación de la turbina. Las expresiones correspondientes, según el valor de (θ), son:

$$P(\theta) = \begin{cases} 4.8 \times D_o, & si\ \theta < 30° \\ 4 \times D_o, & si\ \theta = 30° \\ 3.2 \times D_o, & si\ \theta > 30° \end{cases} \quad (7)$$

Continuando con el cálculo de los ángulos característicos de la turbina, se obtienen los ángulos α y β, los cuales representan las inclinaciones formadas entre la hélice y los diámetros exteriores e interiores, respectivamente.

- El ángulo α se obtiene a partir de la relación senoidal entre el diámetro exterior del tornillo y la hélice helicoidal.
- El ángulo β se determina de manera análoga, considerando la hélice en función del diámetro interior.

Estos ángulos se determinan mediante las siguientes expresiones:

$$\alpha = arctan\left(\frac{\pi \times D_o}{P}\right) \quad (8)$$

$$\beta = arctan\left(\frac{\pi \times D_i}{P}\right) \quad (9)$$

Los parámetros anteriormente mencionados (K, P, α y β) se ilustran en la Fig. 2. La cual presenta la representación geométrica más cercana del tornillo.

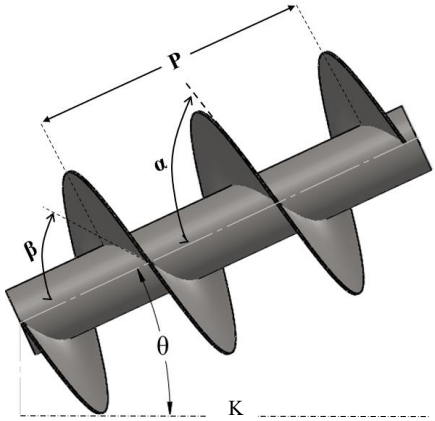


Fig. 2. Perfil de una turbina AST.

En esta etapa, se definen dos parámetros geométricos relacionados con el diámetro exterior del tornillo.

El primero es el espacio entre el tornillo y la cama de agua (G_w) (D. M. Nuernbergk y C. Rorres, 2013), el cual representa la holgura necesaria para permitir el giro libre del tornillo sin contacto con la base del canal. Este parámetro influye directamente en la eficiencia hidráulica, así como en las pérdidas por fricción y filtración, cuya determinación se realiza mediante la siguiente expresión:

$$G_w = 0.0045\sqrt{D_o} \quad (10)$$

El segundo parámetro es el diámetro del tubo contenedor (Dt), que se obtiene sumando el diámetro exterior del tornillo más dos veces la brecha, según la siguiente expresión:

$$D_t = D_o + 2G_w \quad (11)$$

Estos dos parámetros se ilustran de manera más clara y representativa en la Fig. 3, la cual muestra la relación geométrica entre el tornillo, la estructura de confinamiento y el espacio destinado al funcionamiento hidráulico.

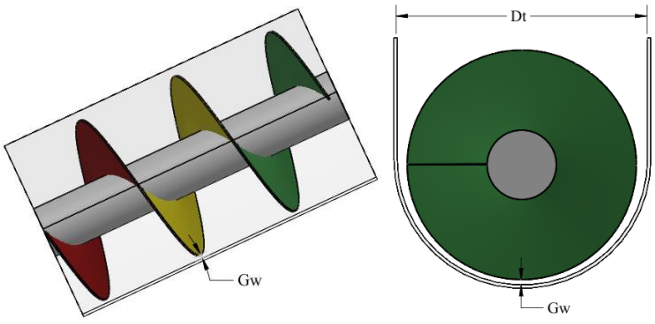


Fig. 3. Vista de un tornillo AST: (a) vista lateral izquierda y (b) vista frontal.

La carga hidráulica se define como la diferencia de altura entre el nivel de entrada y el nivel de salida del agua que fluye a través de la turbina (S. Christopher Simmons y W. David Lubitz, 2021). Matemáticamente, se calcula considerando el nivel superior e inferior del agua:

$$H = L \times \sin(\theta) + h_u - h_l \quad (12)$$

Donde h_u representa el nivel superior del agua y h_l el nivel inferior. Las ecuaciones que definen estos niveles se presentan a continuación:

$$h_u = h_2 + \frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{h_2 \times D_t}\right)^2 \left[1 + \zeta U - \frac{h_2^2}{h_1}\right] \quad (13)$$

$$h_l = \left(\frac{D_o + D_i}{2}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{P \times \tan(\theta)}{\pi \times D_i}\right)^2}\cos(\theta) - \left(\frac{P}{N}\right)\sin(\theta) \quad (14)$$

Donde:

- h_1 y h_2 corresponden a las alturas específicas entre el canal y el tornillo.
- g es la constante de aceleración gravitacional (m/s^2).
- ζU es un coeficiente que representa la pérdida hidráulica, cuyo valor se ha establecido en 0.119.

2.4 Eficiencia de la turbina

Para determinar la eficiencia de la turbina, es necesario calcular tanto la potencia disponible como la potencia extraída. En un estudio realizado por Cristian Purece y Lilica Corlan, se propuso una relación específica para evaluar la eficiencia de una turbina AST, expresada de la siguiente manera (C. Purece y L. Corlan, 2021):

$$\eta = \frac{P_{extraída}}{P_{disponible}} \quad (15)$$

La potencia extraída (Pe) por la turbina se determina de la siguiente manera:

$$P_{extraída} = \tau\left[\frac{2\pi \times n}{60}\right] \quad (16)$$

Donde:

- τ es el torque (N × m).
- n es la velocidad angular del rotor (rpm).

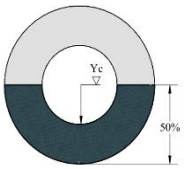
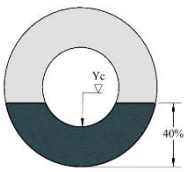
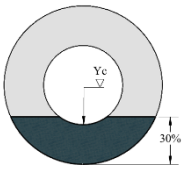
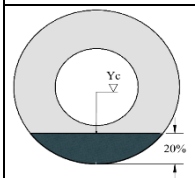
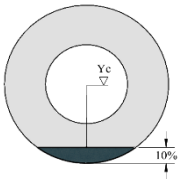
En diversos estudios, la potencia extraída puede calcularse a partir del torque y la velocidad angular. Para ello, se recomienda el uso de simulaciones numéricas, que permiten determinar con mayor precisión el torque según el comportamiento hidráulico y mecánico de la turbina.

Alternativamente, la ecuación (17) permite estimar el torque mediante parámetros hidráulicos y geométricos, siempre que se consideren adecuadamente los límites de llenado de agua, los cuales influyen directamente en su magnitud.

$$\tau = \rho \times g \times L \times A \times \sin(\theta) \times \tan(\alpha) \times Yc \quad (17)$$

Estos límites se resumen en la Tabla 3, la cual presenta los niveles de llenado del canal en relación con el volumen útil de operación. A partir de estos niveles, se derivan dos valores claves: el área de flujo en contacto con el tornillo y la altura crítica de llenado (Yc), que corresponden al punto de máximo torque, según lo establecido por Alberto Mejia, J. C (J. C. Alberto Mejia, 2011).

Tabla 3. Resumen de formulaciones para el llenado óptimo de una turbina AST.

Área de contacto	Área	Porcentaje	Yc
	$A = \frac{3}{8}\pi R^2$	50%	Yc = 0.4951R
	$A = \frac{3}{10}\pi R^2$	40%	Yc= 0.6037R
	$A = \frac{9}{40}\pi R^2$	30%	Yc = 0.6907R
	$A = \frac{3}{20}\pi R^2$	20%	Yc = 0.7544R
	$A = \frac{3}{40}\pi R^2$	10%	Yc = 0.8471R

Continuando con el análisis de la eficiencia, es necesario determinar la potencia disponible, la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$P_{disponible} = H \times \rho \times g \times Q \quad (18)$$

Esta ecuación es válida tanto para enfoques experimentales como computacionales (E. Fiardi, 2014). Cabe destacar que se trata de una formulación ampliamente reconocida en la literatura debido a su uso generalizado para la estimación de esta variable.

2.5 Diagrama del proceso de diseño.

En la Fig. 4 se presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso de definición y construcción geométrica de una turbina AST. Este esquema tiene como objetivo guiar el proceso de diseño, considerando dos posibles escenarios: cuando la carga hidráulica es conocida y cuando no lo es.

El proceso inicia con la determinación de dos parámetros principales que definen la geometría del sistema: la longitud del tornillo y el ángulo de inclinación.

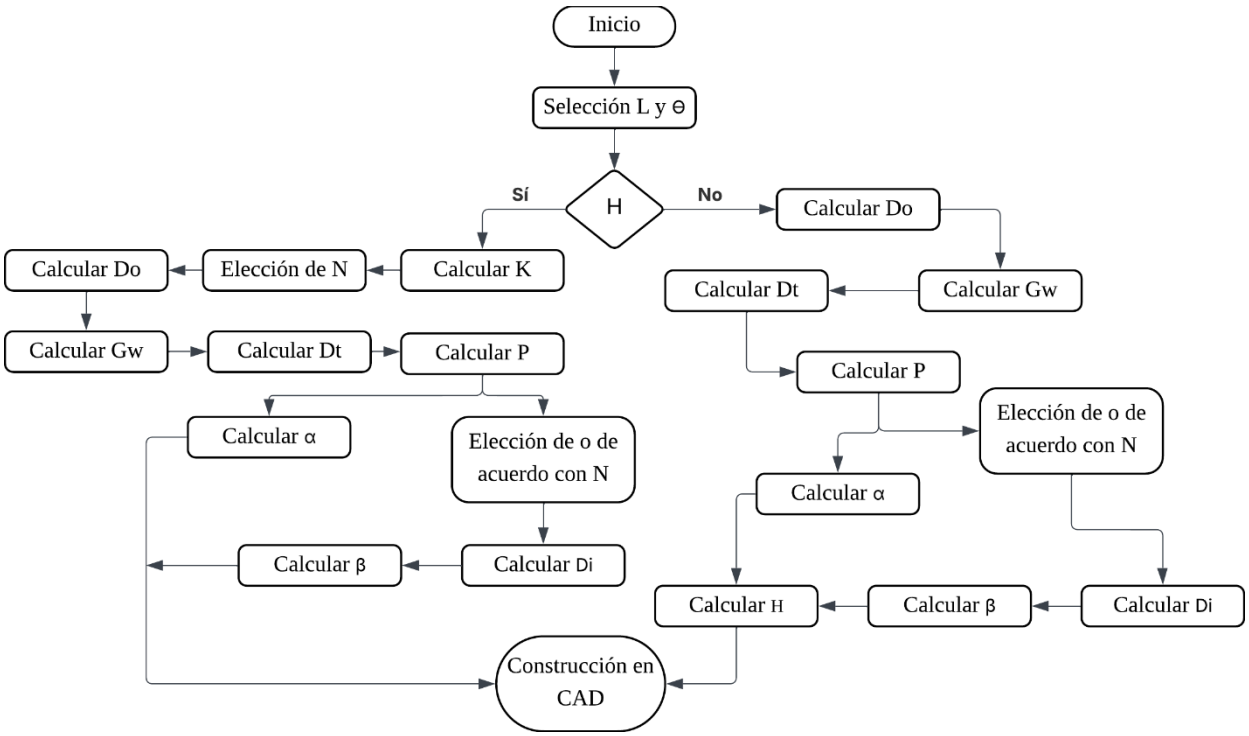


Fig. 4. Diagrama de flujo correspondiente al proceso de cálculo y diseño de una turbina AST.

2.6 Referencias de validación del modelo matemático

En este trabajo no se desarrollaron pruebas computacionales, ni experimentales; sin embargo, se emplearon las ecuaciones y geometrías previamente validadas en investigaciones recientes sobre turbinas AST. Lamesgin y Negash (H. Beza Lamesgin and A. Negash Ali, 2024) aplicaron estas ecuaciones en un proceso de optimización con ANSYS FLUENT, logrando incrementar la eficiencia de la turbina de 55.4% al 92%. Por lo tanto, las ecuaciones utilizadas en este estudio se fundamentan en modelos comprobados y se emplean como referencia teórica, siguiendo una secuencia lógica que permite definir los parámetros principales de una turbina AST y mantener coherencia con estudios validados en la literatura

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El diagrama propuesto funciona como una guía de diseño que, a partir de los datos del sitio, como el caudal disponible y la selección del ángulo de inclinación, permite determinar de manera consistente el diámetro exterior e interior, el paso, los ángulos de inclinación, la holgura y el diámetro del tubo contenedor.

Además, se verifica la carga hidráulica mediante los niveles h_u y h_l, estableciendo así la relación entre el diseño geométrico y el desempeño de la turbina, evaluado a través del torque y la eficiencia.

A continuación, se presentan algunos datos relevantes para el análisis:

- Datos de entrada: caudal y ángulo de inclinación.
- Diámetro exterior: seleccionar la ecuación más adecuada entre las cuatro disponibles para determinar el mejor ajuste según los datos de entrada.
- Diámetro interior: definir el número de hélices del diseño de la turbina.
- Paso: considerando el ángulo de inclinación, se emplea la ecuación apropiada para el cálculo.
- Ángulos α y β: se deben calcular estos ángulos a partir de los diámetros y el paso de la hélice.

- Holgura y tubo contenedor: se determinan para minimizar las filtraciones sin riesgo de contacto entre el tornillo y la estructura.

Considerando estos aspectos, se reducen los errores de diseño y configuración, que serán los datos de entrada para el modelado CAD tridimensional de la turbina AST, su análisis numérico mediante simulación CFD y su posterior validación experimental.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología de cálculo que guía, de manera sencilla y estructurada, el proceso de diseño de una turbina AST. Partiendo de datos del sitio, como el caudal disponible y el ángulo de inclinación, el esquema permite determinar de forma coherente las dimensiones clave de la turbina, como los diámetros, ángulos, paso helicoidal, entre otros parámetros relevantes.

Este enfoque facilita un diseño más rápido, ordenado y comprensible, ya que muestra cómo cada variable del sistema se ve afectada al modificar la otra.

Por otra parte, para garantizar un buen desempeño de la turbina, es fundamental emplear formulaciones dentro de sus intervalos de validez, asegurando la coherencia de unidades y ajustando cuidadosamente el nivel de llenado hasta alcanzar su altura crítica, ya que esta variable influye directamente en la eficiencia y el torque del sistema.

Según los resultados reportados por Lamesgin y Negash, el correcto uso de estas deducciones matemáticas se refleja en el mayor rendimiento obtenido durante las pruebas computacionales, lo que evidencia la validez del enfoque aplicado.

REFERENCIAS

A. Dragomirescu, 2021. Design considerations for an Archimedean screw hydro turbine. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd. https://doi.org/10.1088/1755-1315/664/1/012034.

A. Yoosefdoost and W. David Lubitz, 2021. Archimedes Screw Design: An Analytical Model for Rapid Estimation of Archimedes Screw Geometry. *Energies*, 14(22). https://doi.org/10.3390/en14227812.

C. Purece and L. Corlan, 2021. Archimedean screw as fish-friendly turbines for harnessing hydropower potential. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128602007.

C. Rorres, 2000. *THE TURN OF THE SCREW: OPTIMAL DESIGN OF AN ARCHIMEDES SCREW. / JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*.

D. M. Nuernbergk and C. Rorres, 2013. Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), pp.213–220. https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000661.

E. Fiardi, 2014. *Preliminary Design of Archimedean Screw Turbine Prototype for Remote Area Power Supply*. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-Science and Engineering*, .

F. Gonzáles Gonzales, A. Barbón, L. Bayón and R. Georgious, 2024. An Experimental Investigation of Various Control Systems for an Archimedes Screw Turbine in a Micro-Hydropower Plant. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(2). https://doi.org/10.3390/app14020512.

G. Dellinger, S. Simmons, W. D. Lubitz, P. A. Garambois and N. Dellinger, 2019. Effect of slope and number of blades on Archimedes screw generator power output. *Renewable Energy*, 136, pp.896–908. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.060.

H. Beza Lamesgin and A. Negash Ali, 2024. Optimization of screw turbine design parameters to improve the power output and efficiency of micro-hydropower generation. *Cogent Engineering*, 11(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2327906.

J. C. Alberto Mejia, 2011. *DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA BASADA EN EL TORNILLO DE ARQUÍMEDES*. Universidad de el Salvador.

R. Thakur, T. Kashyap, R. Kumar, R. Kumar Saini, D. Lee, S. Kumar and T. Singh, 2024. Potential of the Archimedes screw to generate sustainable green energy for mini, micro, and pico hydro Turbine power stations: An extensive analysis. *Energy Strategy Reviews*, 55. https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101514.

S. Christopher Simmons and W. David Lubitz, 2021. *Archimedes screw generators for sustainable micro-hydropower production*. *International Journal of Energy Research*, https://doi.org/10.1002/er.6893.

Uniyal, V., Karn, A. and Singh, V.P., 2025. *Parametric sensitivity analysis of Archimedes screw turbines for high-efficiency and sustainable hydropower*. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, https://doi.org/10.1080/15567036.2025.2553226.

Villanueva, E.A., Canales, P.D.I., Paccori, M.G.M., Tueros, J.V.C. and Hinostroza, K.G.I., 2025. Portable Hybrid System for Producing Green Hydrogen by Electrolysis Using Energy Generated Through an Archimedean Screw. *Nature Environment and Pollution Technology*, 24(2). https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i02.D1658.

Design and Evaluation of a Low-Cost Solar Still for Water Purification

Sánchez Álvarez J. S.*, Demesa-López F.N.*, Gutiérrez González E.*, Serrano-Arellano J.*

**División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / IT de Pachuca. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo., C.P. 42080. México.*
e-mail: juan.sa@pachuca.tecnm.mx

Abstract:

This study presents the design, construction, and experimental evaluation of a low-cost solar still for producing distilled water from saline sources. The system was built using accessible materials, consisting of two transparent PET bottles of different sizes that form an integrated evaporation–condensation unit. Outdoor tests were conducted in Pachuca, Mexico, over a one-week period, including twelve experimental sessions under variable climatic conditions. Results showed a production rate ranging from 35 to 73 mL per three-hour session, with higher yields achieved on sunny days with high UV index and low relative humidity. The pH of the distilled water remained between 6.5 and 7.2, within the neutral range, and the average thermal efficiency was 8%, comparable to other low-cost solar stills reported in the literature. The study demonstrates the technical feasibility of using simple and sustainable systems for small-scale water purification, highlighting their potential as decentralized solutions to water scarcity in rural communities. These findings contribute to the advancement of clean technologies aligned with the Sustainable Development Goals, particularly those related to clean water access and climate action.

Keywords: **Solar Still, Desalination, Renewable Energy, Water Purification, Low-Cost Technology**

1. INTRODUCCIÓN

La escasez hídrica es uno de los problemas más relevantes que enfrentan las comunidades en regiones áridas o con acceso limitado a fuentes seguras de agua. Para mitigar esta situación, se han desarrollado diversas tecnologías, como la ósmosis inversa y la destilación multietapa. Aunque efectivas, estas soluciones presentan inconvenientes relacionados con su alto consumo energético, los costos de operación y mantenimiento, así como el impacto ambiental derivado de la disposición de la salmuera residual (Elimelech & Phillip, 2011).

El cambio climático y el crecimiento poblacional intensifican la escasez de agua a nivel mundial, provocando sequías más severas y prolongadas, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Hoekstra, 2014; Richter et al., 2020; Tang, 2020). Esta situación afecta no solo el consumo humano, sino también sectores esenciales como la agricultura, que depende directamente de la disponibilidad de agua para la producción de alimentos (Gerten et al., 2020; Huang et al., 2017). Ante este panorama, resulta urgente promover soluciones descentralizadas, sostenibles y de bajo costo que permitan aprovechar fuentes alternativas de agua y energías limpias. En este contexto, los destiladores solares construidos con materiales reciclados representan una opción viable y accesible para comunidades rurales, al ofrecer un método simple para obtener agua purificada utilizando únicamente energía solar.

La destilación solar se presenta como una alternativa sostenible, ya que aprovecha la energía renovable del sol para transformar agua salada o contaminada en agua destilada. Entre los distintos diseños existentes, el tipo caseta o invernadero es uno de los más empleados por su sencillez y bajo costo. Este consiste en una cubierta transparente inclinada que permite el ingreso de radiación solar, calentando el agua hasta su evaporación. El vapor generado se condensa en la cara interna del vidrio o plástico y se recolecta como agua limpia (Tiwari et al., 2003).

Estudios previos han demostrado que el rendimiento de estos sistemas puede incrementarse mediante modificaciones simples, como el uso de materiales con alta absorción térmica (pintura negra mate) o la incorporación de mechas de tela oscura que amplían la superficie de evaporación (Kumar & Tiwari, 2009). Asimismo, factores ambientales como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento influyen directamente en su desempeño. En entornos rurales, la posibilidad de fabricarlos con materiales reciclados o de bajo costo aumenta su viabilidad y facilita su adopción comunitaria.

A nivel global, más del 40 % de la población enfrenta limitaciones en el acceso a agua segura, lo que resalta la necesidad de tecnologías sostenibles, accesibles y de bajo impacto ambiental (UNESCO, 2023; WHO, 2022). En este contexto, el desarrollo y evaluación de destiladores solares de bajo costo resulta de gran relevancia, ya que ofrece una alternativa descentralizada para la producción de agua potable en comunidades rurales o zonas con infraestructura limitada.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es diseñar, construir y evaluar experimentalmente un destilador solar de bajo costo, fabricado con materiales disponibles localmente, que permita analizar su desempeño térmico y su capacidad de producción de agua destilada bajo condiciones climáticas reales. Además, se presenta un esquema fenomenológico (Figura 1) que ilustra los procesos de transferencia de calor y masa involucrados —irradiancia solar, evaporación del agua, transporte del vapor y condensación—, lo que permite comprender el funcionamiento general del sistema.

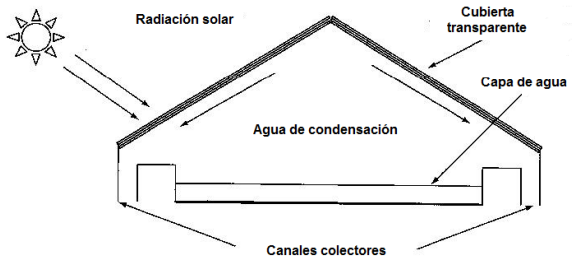


Figura 1. Fenomenología del proceso de destilación solar. (González, 2020)

Diversas tecnologías han sido desarrolladas para mejorar la disponibilidad de agua potable, especialmente en regiones áridas o con acceso limitado a fuentes seguras. Los métodos tradicionales, como la ósmosis inversa y la destilación multietapa, si bien eficaces, presentan desafíos relacionados con el alto consumo energético, los costos de operación y mantenimiento, y el impacto ambiental derivado de la salmuera residual.

Entre las alternativas, la destilación solar se presenta como una solución sostenible y de bajo costo, al aprovechar la energía del sol para evaporar y condensar el agua, imitando el ciclo hidrológico natural. Existen diferentes tipos de destiladores solares, destacando el diseño tipo caseta por su simplicidad constructiva y facilidad de operación. Este sistema consiste en una caja inclinada cubierta por vidrio transparente, que permite el ingreso de radiación solar para calentar el agua y favorecer la evaporación, condensándose luego en la superficie interna del vidrio para su recolección.

La eficiencia de este proceso depende de múltiples factores:

- Energía solar: La radiación solar es la fuente principal de calor, medida en W/m², y su aprovechamiento óptimo se logra orientando la superficie del destilador según la latitud y estación del año.
- Evaporación y condensación: El agua se evapora al aumentar su temperatura y el vapor se condensa en superficies frías. Una inclinación adecuada y el uso de materiales que faciliten la transferencia de calor mejoran el rendimiento.
- Transferencia de calor: El sistema opera por conducción, convección y radiación, donde la pintura negra mate en la base y el aislamiento térmico ayudan a retener calor.
- Materiales y propiedades ópticas: El uso de materiales con alta absorción térmica y superficies transparentes para la cubierta es esencial para maximizar la captación de energía.
- Factores ambientales: La temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento y nubosidad influyen directamente en la producción de agua.

Diversos estudios han demostrado que la implementación de mejoras simples como el uso de materiales de alta absorción, espejos reflectores o mechas absorbentes puede incrementar la eficiencia de un destilador solar en más de un 50% respecto a diseños básicos. Además, el uso de materiales reciclados y la facilidad de construcción lo convierten en una herramienta viable para comunidades rurales, con un potencial impacto positivo en la salud, economía y autosuficiencia hídrica.

2. Metodología

El estudio se desarrolló mediante la construcción y evaluación de un prototipo casero de destilador solar, con el propósito de analizar su capacidad para producir agua desalinizada a partir de una solución salina, empleando únicamente la radiación solar como fuente de energía. Las pruebas experimentales se realizaron al aire libre, en condiciones climáticas naturales, durante el periodo del 20 al 27 de julio de 2025.

2.1. Materiales y herramientas para el prototipo experimental

El prototipo se construyó con materiales reciclados de bajo costo y fácil disponibilidad:

- Botella grande de PET (9 L, transparente) utilizada como cámara exterior de condensación y botella pequeña de PET (1 L, transparente) para contener el agua salinizada. (Figura 2)
- Cúter para realizar cortes precisos en las botellas.
- Silicón en barra para sellar uniones y evitar fugas.
- Agua salinizada preparada con 35 g de sal/L para simular agua de mar.
- Termómetro digital (rango 0-100 °C) para medición de temperatura.

Figura 2. a) botella de PET 5 lts, b) botella 1. 5 lts.

Se utilizó polietileno tereftalato (PET) tipo 1, obtenido de botellas comerciales transparentes de agua y bebidas carbonatadas. Este tipo de PET presenta una alta transmitancia solar (≈85–90%), buena resistencia térmica hasta 70–80 °C, y estabilidad química suficiente para aplicaciones de destilación solar de baja temperatura.

2.2. Diseño y construcción del prototipo

Se realizó un corte de la botella exterior para permitir la inserción de la botella interior. (Figura 3)

Figura 3. Corte de la botella exterior.

Posteriormente, se realizó un corte rectangular en la parte superior de la botella interior para facilitar el llenado. (Figura 4)

Figura 4. Corte rectangular en la parte superior

Colocación de la botella pequeña en el interior de la botella grande con una inclinación de 45°, favoreciendo la condensación (Figura 5)

Figura 5. Introducción de botella pequeña en la botella grande.

Aplicación de silicón en las uniones de la botella exterior para sellar y evitar perdidas de vapor, mejorando el aislamiento térmico del prototipo. (Figura 6)

Figura 6. Aplicación de silicón

Finalmente, se verificó que el prototipo estuviera estable, sin fugas importantes y que el vapor pudiera condensarse correctamente dentro de la botella exterior. (Figura 7)

Figura 7. Presentación final del prototipo

2.2. Preparación de agua salina

Elaboración de solución de 35 g de sal por litro de agua. Se utilizaron 500 ml de la solución en cada sesión experimental

Condiciones de prueba

- Espacio con exposición directa a radiación solar.
- Dos sesiones diarias: 11:00–14:00 y 15:00–18:00.
- Registro de temperatura ambiente, humedad relativa, nubosidad y viento.

Registro de datos y análisis

- Medición del volumen de agua destilada recolectada al final de cada sesión.
- Determinación del pH del agua obtenida mediante medidor digital.
- Comparación de resultados bajo diferentes condiciones climáticas.

3. Resultados

Durante las doce sesiones experimentales realizadas entre el 20 y el 27 de julio de 2025, el destilador solar de bajo costo mostró una producción de agua destilada que osciló entre 35 mL y 73 mL por sesión, utilizando 500 mL de agua salinizada como volumen inicial. Los resultados indican una producción promedio de 57.5 mL por sesión, equivalente a un rendimiento global del 11.5 % respecto al volumen alimentado. (Tabla 1)

Tabla 1. Agua recolectada (ml)

Fecha	Horario	ml
20-jul-25	11am - 2 pm	60
	3 pm - 6 pm	45
22-jul-25	11am - 2 pm	70
	3 pm - 6 pm	62
24-jul-25	11am - 2 pm	68
	3 pm - 6 pm	52
25-jul-25	11am - 2 pm	73
	3 pm - 6 pm	61
26-jul-25	11am - 2 pm	40
	3 pm - 6 pm	35
27-jul-25	11am - 2 pm	66
	3 pm - 6 pm	58

En general, la mayor producción se obtuvo en las sesiones matutinas (11:00–14:00 h), con valores promedio de 62 mL, mientras que en el turno vespertino (15:00–18:00 h) el promedio descendió a 52 mL. Esta tendencia se asocia al incremento de la radiación solar directa y al menor contenido de humedad relativa durante las primeras horas del día, lo que favorece una mayor tasa de evaporación. (Tabla 2)

Tabla 2. Condiciones climáticas de los días de sesiones experimentales

Sesión	Temperatura	Humedad	Índice UV
1	23°C	50%	8
2	21°C	60%	5
3	24°C	43%	9
4	23°C	46%	7
5	24°C	45%	8
6	22°C	55%	6
7	25°C	40%	9
8	23°C	50%	7
9	21°C	65%	4
10	20°C	70%	3
11	23°C	50%	8
12	22°C	55%	6

Así mismo, se observó que los días 22 y 25 de julio concentraron las producciones más altas (70–73 mL), coincidiendo con jornadas de cielo despejado y altos índices de irradiancia y UV, mientras que los valores mínimos (35–40 mL) ocurrieron el 26 de julio, día con cobertura nubosa y mayor humedad relativa.

Estos resultados confirman la fuerte dependencia del proceso de destilación solar con las condiciones meteorológicas locales, especialmente con la irradiancia, la temperatura ambiente y la humedad relativa. Un registro meteorológico horario o el uso de una estación automática permitirían correlacionar de forma más precisa estos parámetros con la productividad térmica del sistema.

Se realizaron también, las mediciones de pH del agua destilada, los valores oscilaron entre 6.5 y 7.2, lo que indica que el proceso de destilación redujo de manera significativa la presencia de sales y contaminantes disueltos en el agua salinizada.(Tabla 3) Sin embargo, el pH por sí solo no constituye un indicador completo de ausencia de impurezas o contaminante ya que otros parámetros fisicoquímicos, como la conductividad eléctrica, el contenido iónico o el contenido de sólidos disueltos totales (TDS), deben considerarse en futuras evaluaciones para verificar la calidad final del agua producida.

Tabla 3. Prueba de PH.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PH	6.9	6.8	7.1	7	6.8	6.7	7.2	7	6.6	6.5	7.1	6.9

La eficiencia térmica del destilador solar (η) se define como la relación entre la energía útil obtenida en forma de agua evaporada/condensada y la energía solar total incidente sobre la superficie colectora durante el tiempo de operación

Parámetro	Símbolo	Valor
Masa de agua destilada producida (kg)	m_w	0.07kg (para 70 mL de agua destilada)
Calor latente de vaporización del agua (≈ 2.26 × 10⁶ J/kg a 100 °C, o 2.43 × 10⁶	h_{fg}	2.43×10^6 J/kg
Área de captación del destilador (m²)	A	0.25m^2 (por ejemplo, 0.5 m × 0.5 m si esa es la base del destilador)
Irradiancia solar promedio (W/m²)	I	800W/m2 (irradiancia promedio a mediodía)
Tiempo de operación (s)	t	3h=10,800s

$$\eta = \frac{m_w + h_{fg}}{I \,.\, At}$$

$$\eta = 0.079 = 7.9\%$$

La eficiencia térmica promedio del sistema fue de aproximadamente 8%, valor que, aunque ligeramente inferior al rango reportado en otros destiladores solares de bajo costo (10–13%) (Kabeel et al., 2018; Sharshir et al., 2018), confirma la viabilidad funcional del prototipo para la obtención de agua potable a partir de energía solar. La diferencia puede atribuirse a variaciones en las condiciones meteorológicas, pérdidas térmicas por el aislamiento y al uso de materiales reciclados de menor conductividad térmica.

El desempeño del sistema podría mejorarse mediante tres estrategias principales:

1. Incorporar aislamiento térmico en las paredes laterales para reducir pérdidas de calor por convección.
2. Optimizar la geometría de la cubierta y la pendiente del condensador para facilitar la recolección del condensado.
3. Sustituir o complementar el aluminio con materiales de mayor conductividad térmica (por ejemplo, cobre o acero inoxidable pintado de negro mate).

La implementación de destiladores solares de este tipo representa una alternativa viable para comunidades rurales o costeras con acceso limitado a agua potable, debido a su bajo costo, sencillez de construcción y uso exclusivo de energía solar. Además, contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 13), relacionados con el acceso universal al agua limpia y la mitigación del cambio climático.

4. Conclusiones

El destilador solar de bajo costo diseñado y construido demostró ser una alternativa viable para la producción de agua potable mediante energía solar, alcanzando una eficiencia térmica aproximada del 8% bajo condiciones climáticas reales. Los valores de pH entre 6.5 y 7.2 confirmaron la efectividad del proceso de destilación en la eliminación de impurezas, obteniéndose agua apta para consumo humano.

Aunque la eficiencia obtenida fue ligeramente inferior a la reportada en otros estudios (10–13%), el desempeño del sistema valida su funcionamiento básico y potencial de aplicación en comunidades rurales o costeras con limitado acceso a agua y energía. Factores como la radiación solar incidente, el aislamiento térmico y el tipo de materiales empleados influyeron significativamente en la producción.

Se recomienda optimizar futuras versiones del prototipo mediante mejoras en el diseño geométrico, uso de materiales con mayor absorción y retención térmica, y la implementación de estrategias de recuperación de calor para incrementar la eficiencia global del sistema. En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la viabilidad técnica y ambiental del destilador como solución sostenible y accesible frente a la escasez de agua potable.

REFERENCIAS

Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. Science, 333(6043), 712–717. https://doi.org/10.1126/science.1200488

Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J., Bodirsky, B. L., Fetzer, I., Jalava, M., et al. (2020). Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. Nature Sustainability, 3(3), 200–208. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1

González Velasco Jaime. (2020) Aprovechamiento térmico de la energía solar. https://www.researchgate.net/publication/344626661

Huang, J., Yu, H., Dai, A., Wei, Y., & Kang, L. (2017). Drylands face potential threat under 2°C global warming target. Nature Climate Change, 7(6), 417–422. https://doi.org/10.1038/nclimate3275

Hoekstra, A. Y. (2014). Water scarcity challenges to business. Nature Climate Change, 4(5), 318–320. https://doi.org/10.1038/nclimate2214

Kumar, S., & Tiwari, G. N. (2009). Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still. Applied Energy, 86(10), 1995–2004. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.005

Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., & Eisa, A. (2018). Enhancing the performance of single basin solar still using high thermal conductivity sensible storage materials. Journal of Cleaner Production, 183, 20–25. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.144

Richter, B. D., Bartak, D., Caldwell, P., Davis, K. F., Debaere, P., Hoekstra, A. Y., et al. (2020). Water scarcity and fish imperilment driven by beef production. Nature Sustainability, 3(4), 319–328. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0483-z

Sharshir, S. W., Peng, G., Elsheikh, A. H., Edreis, E. M. A., Eltawil, M. A., Kabeel, A. E., & Yang, N. (2018). Energy and exergy analysis of solar stills with micro/nano particles: A comparative study. Energy Conversion and Management, 177, 180–191. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.074

Tang, Q. (2020). Global change hydrology: Terrestrial water cycle and global change. Science China Earth Sciences, 63, 459– 462. https://doi.org/10.1007/s11430-019-9559-9

Tiwari, G. N., Singh, H. N., & Tripathi, R. (2003). Present status of solar distillation. Solar Energy, 75(5), 367–373. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.005

UNESCO. (2023). UN World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water.

WHO. (2022). Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2022.

Development of a Solar Trajectory Tracking Algorithm in FPGA for a 265 W Photovoltaic Panel

Aguilar Anastacio, J. Carlos, * Martinez Moreno, Francisco, * Enciso Contreras, Ernesto *

**Posgrado en Eficiencia Energética y Energías Renovables, Tecnológico Nacional de México, Campus Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico s/n, Esq. Av. Carlos Hank González, Valle de Anahuac, Ecatepec de Morelos, Edo de México. CP. 55210. Tel: 015550002343; e-mail: {jcaguilar, 202422051, ernesto_contreras}@tese.edu.mx*

Abstract: A current problem with large-scale photovoltaics panel installations is the short duration of their use during the day at a permanent angle on roofs and flat terrain. This paper proposes a methodology for designing a Field Programmable Gate Array (FPGA) controller for solar phat tracking in azimuth and altitude on a 265W test panel, measuring 1.5m long by 1m wide, this system was developed at the Technological Institute of Ecatepec. The results demonstrate the advantages offered by designing FPGA controller for solar tracking as an alternative for maximizing the use of photovoltaics arrays during the day, compared to stationary arrays. Energy conversion is achieved by performing Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Keywords: Photovoltaic, FPGA, Algorithm, Irradiance, Programming, Tracking.

1. INTRODUCCION

En los recientes años se ha agudizado los efectos de lo contaminación a consecuencia del uso irracional de los hidrocarburos como el petróleo, gas y carbón como principales fuentes convencionales de energía, con el fin de cubrir las necesidades propias y el desarrollo económico de la sociedad en todo el mundo, al mismo tiempo son causantes del 75% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y del 90% de las emisiones del dióxido de carbono como consecuencia del calentamiento global, (Energy Agency, 2024). En el 2022 la participación de las energías renovables a nivel nacional fue de 15.40%, 1.33 puntos porcentuales por arriba de la registrada a nivel mundial. Considerando la mayor participación con fuentes convencionales con el 58.52% derivados del petróleo, con la inclusión de la producción de condensados que representan el 7.54% de la producción nacional de energía primaria [BNM, 2023]. Ante tal escenario, se busca contribuir con el aprovechamiento de los sistemas fotovoltaicos para la conversión de energía solar a eléctrica de manera eficiente durante el día.

Una gran fuente de energía disponible para su conversión de forma directa es el sol que se encuentra a una distancia de 150 millones de kilómetros de la tierra, sinonimo de vida en nuestro planeta, abundante durante los días claros. La radiación solar se emite en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a una velocidad de $2{,}998x10^{8}\ {}^{m}/_{s}$, con una incidencia en la superficie terrestre de 1367 ${}^{W}/_{m^2}$, con ligeras variaciones en las condiciones climáticas durante el año [Duffie, 2013].

Las celdas fotovoltaicas son unidades que transforman la radiación solar en una corriente eléctrica, este proceso se lleva a cabo por el efecto fotoeléctrico o la generación del par electrón-hueco en un material semiconductor que fue descubierto en 1839 por el físico Frances Alexander Edmond Becquerel. La primera celda solar se desarrolló en los laboratorios Bell por Daryl Chapin, Clavin Fuller y Gerald Pearson, las características de las primeras celda fueron de una área de 2 cm^2 con una eficiencia apenas del 6 %, fue presentado al público el 25 de abril de 1954, [Mertens et al., 2014].
Al día de hoy, existe en el mercado una gran variedad de fabricantes y distribuidores de paneles fotovoltaicos que ofrecen por abajo del 30 % de eficiencia.

El crecimiento de instalaciones de sistemas fotovoltaicos en los últimos años ha sido de manera vertiginosa en el sector del hogar e industrial en sus diferentes capacidades de conversión a nivel nacional. Una de las problemáticas que se ha encontrado en la instalación de sistemas fotovoltaicos a nivel de suelo, techos de edificios o casas habitación, es la colocación en posición permanente en dirección al sur con respecto a las coordenadas de la longitud y latitud de la zona de colocación en la República Mexicana.

Estudios han demostrado que, aplicando un sistema de seguimiento solar en los arreglos fotovoltaicos de ciertas capacidades ofrecen ciertas ventajas como:

1.- Ahorro de grandes áreas en terrenos planos
2.- Eliminación de peso en techos de edificios u hogares

3.- Aprovechamiento máximo del recurso solar en los paneles fotovoltaicos de un 30 a 60% más de energía que los modelos fotovoltaicos estáticos, [Wen Lu et al., 2024].

Un sistema de seguimiento solar es un dispositivo mecánico que es capaz de posicionar un arreglo fotovoltaico en dirección al sol, manteniendo la perpendicularidad entre el plano del panel y la incidencia solar en cualquier instante del día, dependiendo del tipo de seguidor en cualquier ubicación de la

tierra, con excepción del ecuador. Esto con el fin de obtener el máximo aprovechamiento de los sistemas de conversión de energía fotovoltaica en energía eléctrica desde el amanecer hasta el atardecer [Machado et al., 2015].

El seguimiento solar existe de dos tipos:

a) **De un eje de rotación o un grado de libertad**, este es un solo ángulo de desplazamiento rotacional azimut, elevación o de eje inclinado.
b) **De dos ejes de rotación o dos grados de libertad**, para realizar la captación de la radiación solar con mayor precisión, ajustando los movimientos del ángulo de altura y azimut, la instalación de un sistema u otro depende directamente de la zona geográfica y de la posición de la trayectoria solar [Prinsloo & Dobson, 2015].

Estos mecanismos requieren sistemas de control desde los más sencillos hasta los más complejos, esto dependerá de la capacidad del arreglo fotovoltaico instalado en el seguidor para la selección del tipo de actuador en conjunto con los mecanismos de posicionamiento. Los de mayor aplicación son: motores de corriente continua, motores de corriente alterna, sistemas neumáticos o hidráulicos, motores a pasos, servomotores [Aguilar et al., 2017].
El panorama del sistema de control en el seguimiento solar ha evolucionado con el surgimiento de nuevas tecnologías con una gran variedad de hardware aplicado hasta nuestros días. Se tienen antecedentes de los primeros controladores como prototipos de investigación implementando sensores analógicos tipo (Light Dependent Resistor, LDR), las resistencias dependientes de la luz son utilizadas frecuentemente para identificar la posición del sol a través de la captación de la luz solar con mayor intensidad. Sistemas de seguimiento de tipo comercial han implementado sistemas de control como (Programmable Logic Controller, PLC) controlador lógico programable, que tiene capacidad de ser programado para almacenar datos de subrutinas de control en conjunto con sensores que suministran información del entorno para la automatización de sistemas mecánicos [Singh et al., 2018]. Otro tipo de hardware implementado en el control de seguimiento son los microcontroladores Pic 16F84, donde realizan el control de servomotores generando una señal digital para el posicionamiento angular, lo que reduce los costos en la implementación de microcontroladores económicos en la etapa de control [Gámez et al., 2019].
El diseño de controladores inteligentes programados en FPGA propone realizar el seguimiento de la luz que emite el sol [Omran et al., 2018]. El uso de la FPGA en la optimización de la incidencia solar en los sistemas fotovoltaicos se ha implementado para el seguimiento solar con el control de motores a pasos con el desarrollo de controladores en lógica difusa con el enfoque de múltiples entradas y salidas (MIMO) como lo presenta [Shehu et al., 2019].
Otra metodología implementada en el seguimiento solar es la obtención del MPPT de una celda fotovoltaica con el desarrollo del algoritmo para la toma de lecturas de corriente y voltaje del sistema fotovoltaico donde la FPGA realiza la ejecución paralela en función de los datos recibidos, tomando decisiones en el control de los actuadores de los ángulos de azimut y de altitud [Sharma et al., 2017].
Otros autores han desarrollado control por modulación de ancho de pulso para el control de servomotores y motores a pasos con la implementación de paneles de baja potencia aplicando la FPGA Altera DE1 [Sohu et al., 2019].

2. METODOLOGIA

2.1 Desarrollo del algoritmo de control en azimut

La metodología de desarrollo del controlador se realiza de forma experimental con el diseño del algoritmo de control para la programación del arreglo de matriz de compuertas lógicas en sitio o también conocido como (Field Programmable Gate Array, FPGA) de la tarjeta Spartan 6. Donde se diseñan librerías específicas para el seguimiento de trayectoria, generación de tiempos de actuación, puesta en marcha de los actuadores en cada uno de los ejes de desplazamiento angular de azimut y altitud. En la figura 1, se presenta el diagrama de bloques del proceso de control, se introducen como datos de inicio la hora, minutos y el número de día.

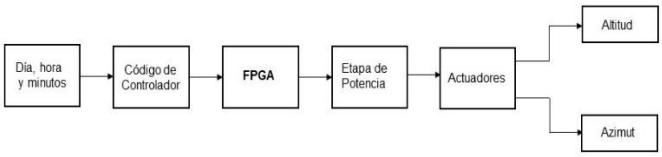


Fig. 1. Diagrama de bloques de la metodología del controlador.

El algoritmo de control del desplazamiento en azimut se muestra en la figura 2, donde se representa el diagrama de flujo y las condiciones para efectuar el movimiento del actuador.

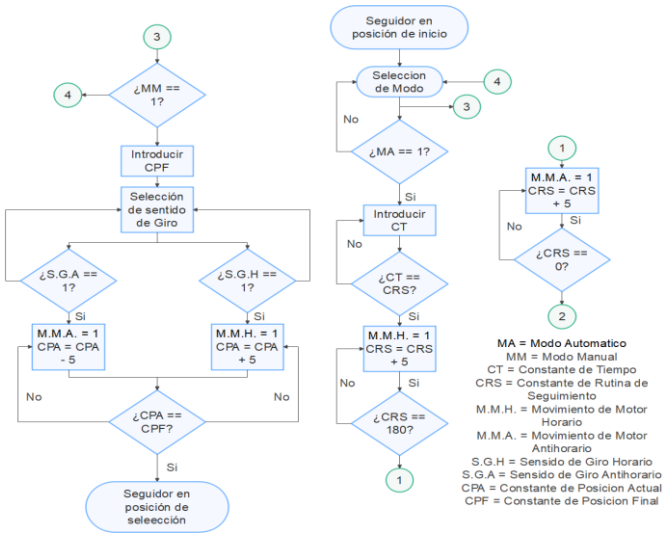


Fig. 2. Diagrama de flujo del controlador de Azimut.

El controlador al inicio del programa pide que se seleccione el modo de uso (MA= Modo Automático) ajusta automáticamente el ángulo correspondiente a la hora del día, se realizan las operaciones para disminuir el error entre el ángulo calculado y el ángulo real de posición en azimut, el

proceso de rotación durante la mañana se lleva a cabo en el sentido de *Este* a *Oeste,* efectuando la comparación de la constante de tiempo (CT) igual a la hora de reloj, con la Constante de Rutina de Seguimiento (CRS), mientras se cumple la igualdad se realiza un incremento de 5 °, en esta acción el actuador (M.M.H= Movimiento de Motor Horario) es activado hasta cumplir con los cinco grados de desplazamiento que se registra a través del encoder o sensor de posición cada 20 minutos, por lo que en una hora se habrá desplazado 15°, ver figura 3, de acuerdo a la literatura se tiene que por cada hora civil que transcurre en la superficie de la tierra existe un desplazamiento de 15°, (1hr = 15°), en el transcurso del día. Una vez que se ha alcanzado las 18 hrs equivalente a 180° durante la tarde, el sistema de seguimiento entra en la etapa de reinicio o regreso a su referencia (0°), para esto el actuador (M.M.A= Movimiento Motor Antihorario) es accionado en sentido reversible, al mismo tiempo el controlador realiza el decremento de 5° continuamente hasta que CRS sea igual a 0° momento en que el actuador es apagado, en espera del siguiente día para realizar el seguimiento con la introducción de la hora de inicio.

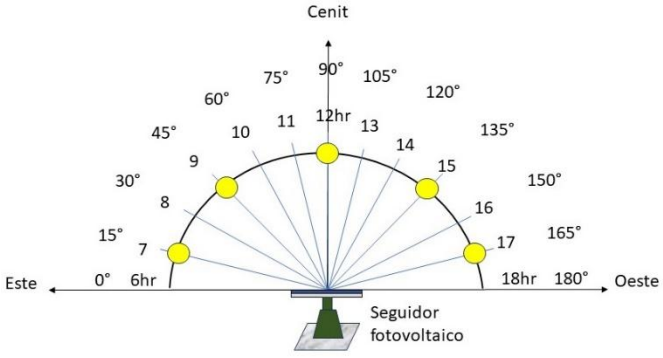


Fig. 3. Trayectoria solar en azimut.

2.2 Desarrollo del algoritmo de control en altitud.

El diagrama de flujo de la figura 4, representa el algoritmo de control para el control de posición angular de la altitud (α) de la celda fotovoltaica a través del actuador o pistón eléctrico considerando la hora de inicio a las seis de la mañana, el procedimiento de actuación se lleva a cabo mientras la CT = CRS, resaltando que el actuador no tiene sensor de posición por lo que se tiene un bucle de tiempo donde el actuador se ajusta cada 20 min por 2 seg. El bucle de temporización de los movimientos pueden inicia a partir de las 6:00 AM a 12:00 PM en un intervalo de desplazamiento angular de 45° a 0°, tomando como referencia de posición las 6:00 AM a 45° hacia el *Este,* con la altura máxima del pistón (M.P.E= Movimiento de Pistón Extracción), ver figura 5, a medida que trascurre el tiempo el actuador entra en la etapa de contracción (M.P.C= Movimiento de Pistón Contracción) hasta las 12:00 PM, donde se ha alcanzado la horizontal de panel fotovoltaico con el ángulo de altura igual a cero grados ($\propto = 0°$), el desplazamiento angular se realiza cada 2.5°. Además, el control cuenta con un modo manual que nos permite manipular el actuador lineal para la variación del ángulo de altitud ($\propto$) del panel fotovoltaico, consulte (1) que determina el desplazamiento angular.

Donde x puede tomar valores en el intervalo de 0 a 45 grados ($x \leq 45°$) cada 20 minutos.

$$\propto = 45° - x \qquad (1)$$

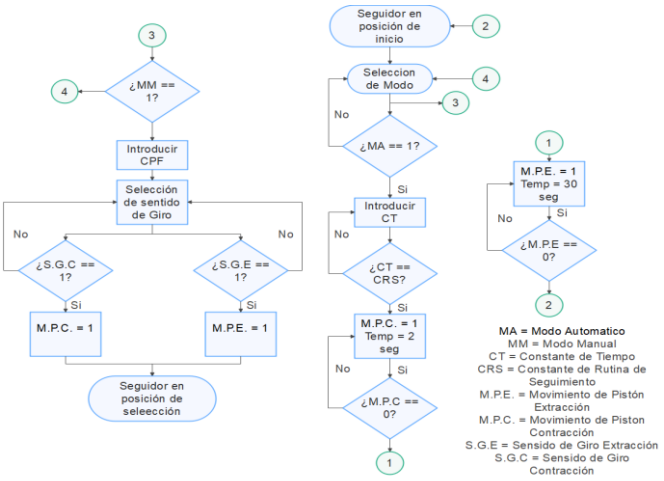


Fig. 4. Diagrama de flujo del controlador de altitud.

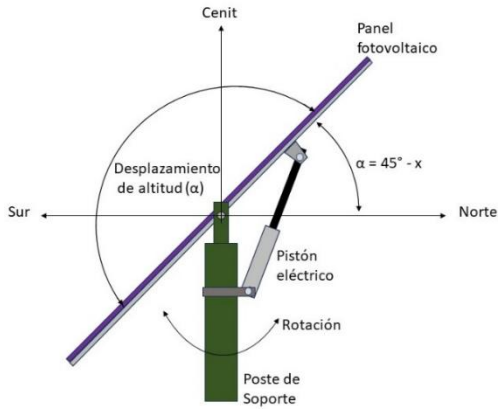


Fig. 5. Desplazamiento de altitud del panel fotovoltaico.

2.3 Programación del controlador en la FPGA.

Cada uno de los algoritmos de flujo de control de azimut y altitud pasan a la fase de desarrollo de programación en la FPGA mediante lenguaje VHDL. En la figura 6, se presenta el diagrama principal de la programación de cada librería que realiza una función específica. Primeramente, se diseña la librería RELOJ donde se asigna la hora del funcionamiento del seguidor solar, este dato se introduce a través de un número binario ajustado con dip switch, dato importante que da inicio a las rutinas del diagrama de flujo de las figuras 2 y 4. Cada bloque en el diagrama está diseñado para procesar la información del sensor, inversión de giro del pistón eléctrico para la contracción extracción del embolo, control del motor en la inversión de rotación, contador de ángulos, seguimiento solar que es la parte principal del trabajo, multiplexores que permiten activar el modo manual o modo automático (seguimiento solar) y permite seleccionar la dirección del actuador en el modo manual, etc.

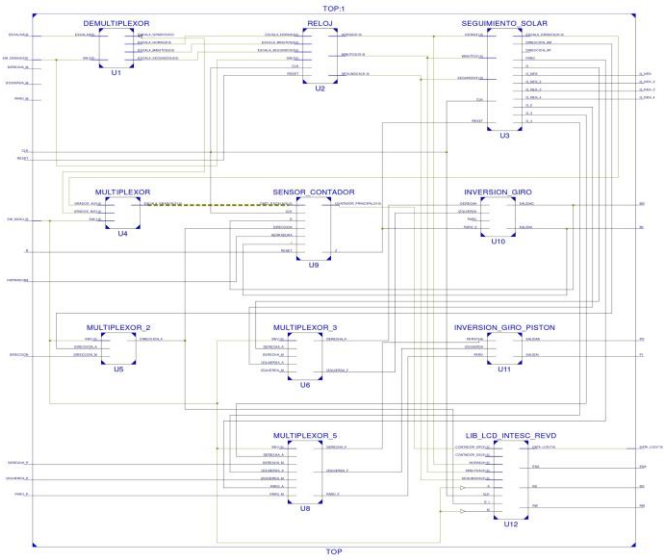


Fig. 6. Esquema de desarrollo de librerías en FPGA Spartan 6.

La tarjeta de la FPGA despliega información en el Display como la hora, el ángulo de posición de altitud, azimut y el sentido de giro de los actuadores. Una de las ventajas de la programación en VHDL es que permite trabajar concurrentemente, es decir, permite ejecutar múltiples librerías a la vez, donde todas las sentencias se ejecutan de manera concurrente, incluidos los procesos que se conforman de lógica secuencial.

3. RESULTADOS

3.1 Prototipo seguidor y tarjeta de control

El resultado del diseño del controlador en FPGA se presenta en la figura 7, donde se muestra el tablero del controlador con la integración de la tarjeta FPGA Spartan 6, marcado con el número 1 en recuadro rojo, y otras tarjetas auxiliares como etapas de potencia, fuentes reguladas, conectores, etc. La figura 8, presenta el desarrollo del prototipo, donde se tiene el panel fotovoltaico con características eléctricas nominales de 265 Wh a 37 Volts a 9 Amp con dimensiones de: 1.64 m de largo x 1 m de ancho x 0.05 m de espesor, sujetado en la parte superior de un poste que puede rotar de 0 a 180° con desplazamiento de altitud de 0 a 45° a través del pistón eléctrico instalado entre el panel y el poste de soporte.

La instalación del prototipo experimental se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec con orientación hacia el Este por las mañanas para el inicio de la rutina de seguimiento. Los resultados del efecto del controlador se pueden observar a través del comportamiento de las gráficas mostradas en la figura 9, donde se presentan dos gráficas comparativas de voltaje generadas por dos paneles con las mismas características mencionadas previamente, uno en estado estacionario a un ángulo fijo de 20° y el segundo con el controlador de seguimiento solar. Las gráficas muestran el comportamiento del voltaje a lo largo del día 01 de agosto de 2024 en un horario de 11:02 AM a las 17:02 hrs.

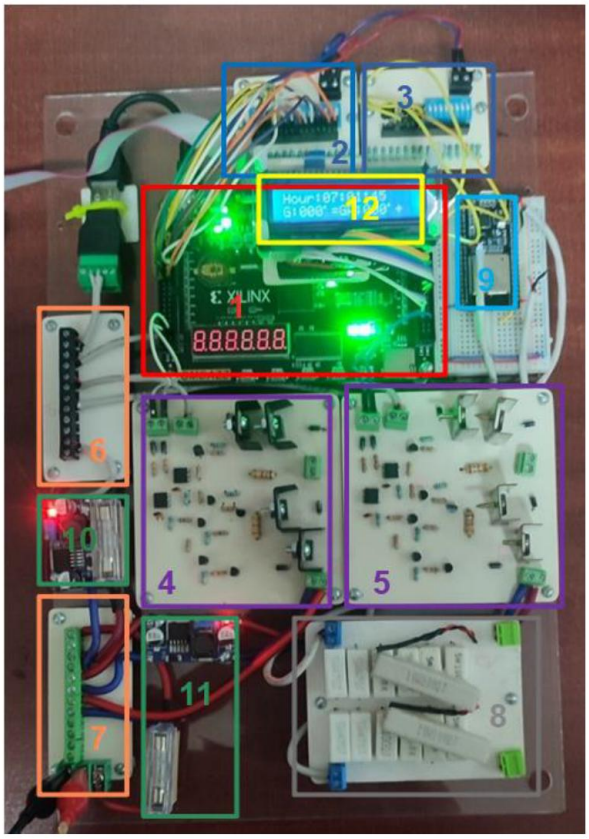


Fig. 7. Tablero controlador con la integración de la FPGA.

Fig. 8. Seguidor solar experimental.

3.2 Gráficas de comparación entre panel fijo y seguimiento

Las figuras 9, 10 y 11 reportan la comparación del voltaje obtenido en las pruebas de seguimiento solar, respecto al panel en estado estacionario a un ángulo permanente de 20° hacia el sur. Los resultados muestran que el voltaje promedio de la celda con seguimiento solar muestra un valor aproximado de 37.61 Volts, mientras que el voltaje promedio en la celda fija presenta un voltaje de 33.65 Volts, mostrando así un 6.69 % más en la celda con seguimiento. La figura 9, presenta la gráfica de comparación de la potencia entre el panel fotovoltaico con seguimiento y el panel estacionario, los resultados muestran que la potencia promedio de la celda con seguimiento genera 329.48 W, por otra parte, la potencia promedio en el panel fijo tiene una generación de 305.20 W, mostrando así un 6.74 % más en la celda con seguimiento. En la figura 10, se muestran las gráficas de comparación de temperatura obtenidas en el seguimiento solar y el panel en posición permanente, donde la temperatura promedio de la celda con seguimiento registra 37.85 °C, en comparación con la temperatura promedio del panel en reposo de 42.20 °C, con una diferencia de 4.35 °C.

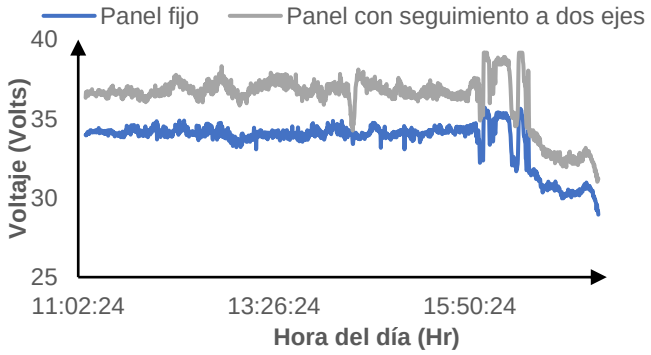


Fig. 9. Gráficas comparativas de voltaje entre panel fijo y con seguimiento.

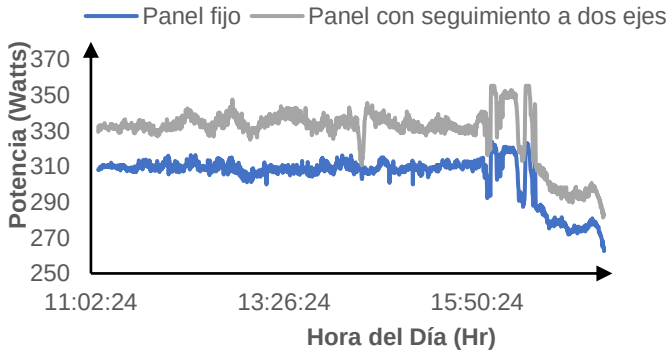


Fig. 10. Gráficas comparativas de potencia entre panel fijo y con seguimiento.

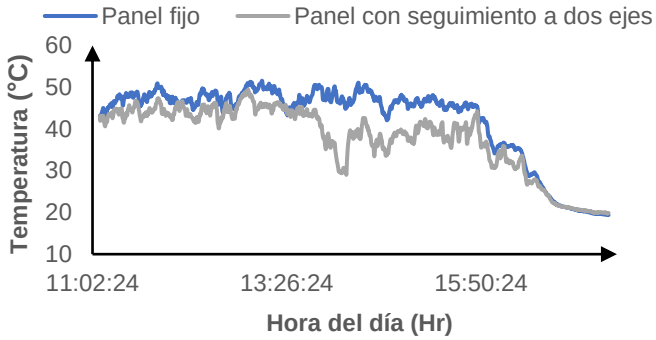


Fig. 11. Gráficas comparativas de temperatura entre panel fijo y con seguimiento.

En la figura 11, se presenta el comparativo del MPPT del panel fotovoltaico con seguimiento y permanente, los resultados muestran los siguientes resultados 273.32 W y 257.02 W respectivamente, donde se presenta un incremento de 4.53% más en el panel con seguimiento.

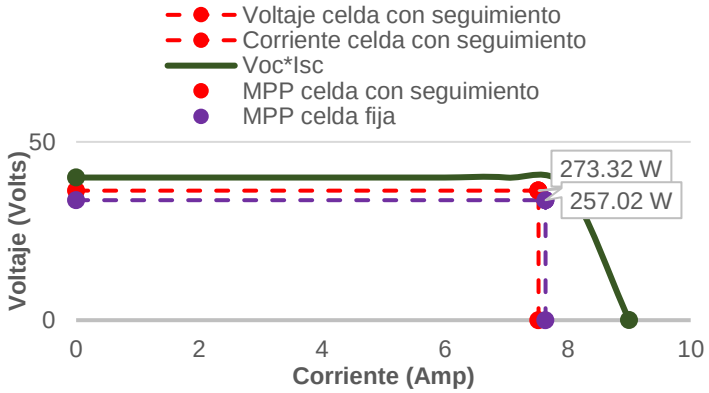


Fig. 12. Gráfica de comparación de MPPT entre panel fijo y con seguimiento.

En la Tabla 1, se presenta el resumen de las variables de los paneles con seguimiento y fijo tomados el día primero de agosto de 2025 en el horario de las 17:00 hrs durante el atardecer, como punto crítico de observación antes del restablecimiento. El resultado del comportamiento se presenta en las gráficas de la figura 11, entre el panel con seguimiento solar, mientras que el segundo panel se encuentra en estado de reposo a un ángulo de inclinación de $\alpha = 20°$ hacia el sur. El MPPT es la potencia presente a cada instante de tiempo, a medida que se desplaza el panel fotovoltaico en los dos ángulos de seguimiento de trayectoria solar, azimut y altitud.

Tabla 1. Resumen de las magnitudes eléctricas en MPPT

Panel Fotovoltaico	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia de prueba (Ω)
Con Seguimiento	273.32	36.32	7.52	100
Fijo con (α= 20°)	257.02	33.65	7.63	100

5. CONCLUSIONES

Los sistemas de seguimiento pueden ser aprovechados para optimizar la conversión de voltaje durante la mayor parte del día en sistemas fotovoltaicos de gran capacidad de generación, donde la instalación puede ser de 8 a 16 paneles por seguidor donde existe una prioridad de obtener una mayor potencia eléctrica, aprovechamiento al máximo el recurso solar como fuente de energía renovable.

El diseño de controladores con tarjetas FPGA ahorran código de programación en comparación con otros microcontroladores como Arduino, tarjetas con microcontroladores de Microchip, incluso tarjetas de adquisición de datos de National Instrument o PLC que son de mayor costo.

El seguimiento solar es una técnica que puede tener beneficios al optimizar los dispositivos de conversión de una fuente de energía a otra como el caso de los espejos parabólicos, planos, lentes de Fresnel, cuando son instalados para una generación en mediana o alta escala, por lo que el aprovechamiento con seguimiento solar puede mantenerse por arriba del 10% de la generación nominal durante el día lo que beneficia en el aprovechamiento máximo de la irradiancia para su conversión.

REFERENCIAS

Anastacio, J. C. (2017). Análisis Dinámico de Servomotor para el Seguimiento Solar a Dos Ejes para el Aprovechamiento Eficiente de una Celda Fotovoltaica de 15 Watts. Revista de Aplicación Científica y Técnica, 47-59.

Balance Nacional de Energía. (2023). Dirección General de Planeación e Información Energética, Cd. de México.

Duffie, J. A. (2013). Solar Enginnering of Thermal Processes. New Jersey, United States. Wiley.

Energy Agency, I. (2024). World Energy Outlook, www.iea.org/terms.

Gámez, M. B. G., Barrios, A. E. C., & Choque, E. C. P. (2019). Diseño de un sistema de seguimiento solar de un eje para el aprovechamiento de la energía solar en sistemas fotovoltaicos. Ciencia y Desarrollo/Ciencia & Desarrollo, 10, 43-46. https://doi.org/10.33326/26176033.2006.10.196.

Machado Toranzo, N., Lussón Cervantes, A., Leysdian Oro Carralero, L., Bonzon Henríquez, J., & Escalona Costa, O. (2015). Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. Ingeniería Energética, XXXVI (2), 190-199.

Mertens, K. (2014). PHOTOVOLTAICS Fundamentals, Technology and Practice . United Kingdom: Wiley.

Omran, A. H. (2018). Maximizing the Power of Solar Cells by Intelligent Solar Tracking System Based on FPGA. Advances in Science and Engineering Technology International., 1-5.

Prinsloo, G., & Dobson, R. (2015). Solar Tracking, Sun Position, Sun Tracking, Sun Following. South Africa.

Rajesh, P., Rajasekar, S., Gupta, R., & Samuel, P. (2014). Solar array system simulation using FPGA with hardware co-simulation. IEEE 23rd, International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). https://doi.org/10.1109/isie.2014.6864975.

Sharma, S. (2017). Design and Development of Maximum Power Point Tracking Algorithm Using Field Programmable Gate Array. International Conference on Recent Trends in Eletronics Information & Communication Technology, 1560-1563.

Shehu, Y. (2019). A FPGA Implementation of a Dual Axis Solar Tracking System. Developments in eSystems Engineering (DeSE), 970-974.

Sohu, I. A. (2019). Implementation of Solar Tracking Design Using FPGA Tool. International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, 1-5.

Singh, R., Kumar, S., Gehlot, A. & Pachauri, R. (2018). An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 3263-3278. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.018.

Wen Lu,. P. Ajay. (2024) Solar PV tracking system using arithmetic optimization with dual axis and sensor. Measurement: Sensors 33, 1-9.

Enhancing Torque Generation in an In-pipe Savonius Turbine Using an Eye-shaped Flow Deflector: A CFD Study

Carrasco García, José *, Rosado-Tamariz, Erik*

** Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira 62490, Cuernavaca, México.*
m24ce082@cenidet.tecnm.mx, erik.rt@cenidet.tecnm.mx.

Abstract: The integration of small-scale hydropower systems into existing pipe networks has emerged as a promising solution for distributed energy generation, particularly in urban infrastructures where conventional hydroelectric plants are impractical. In this context, drag-based turbines offer a compelling alternative due to their simple design and ability to operate under low-flow conditions. However, their performance is often hindered by flow non-uniformities and reduced torque output. This study investigates the impact of a deflector on the torque generation of an in-pipe drag-based Savonius turbine designed for hydropower harvesting in pressurized pipes. The primary objective is to assess how the deflector modifies the incoming flow, enhances momentum transfer with the turbine blades, and ultimately increases torque production. A three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model was developed to simulate the coupled interaction between the turbine rotor and the surrounding fluid. The methodology defines a rotational domain and turbulence modeling to capture the flow features and characteristics around the deflector and turbine blades. Preliminary results show that the inclusion of the deflector promotes a more favorable velocity distribution, reduces flow separation, and improves torque output when compared to the baseline configuration without deflection. These findings underline the potential of flow-guiding devices as a cost-effective strategy for enhancing the performance of drag-based turbines.

Keywords: Drag-based turbine, in-pipe hydro power, torque enhancement, flow deflector, distributed energy generation.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de generar energía limpia y distribuida ha impulsado el desarrollo de soluciones que aprovechen recursos energéticos residuales en sistemas hidráulicos urbanos. Uno de los más relevantes es la presión excedente en redes de distribución de agua, la cual comúnmente se disipa mediante válvulas reductoras de presión (PRV, por sus siglas en inglés), provocando la pérdida de energía útil (Hasanzadeh et al., 2021). Frente a esta problemática, se han propuesto turbinas hidrocinéticas instaladas en tuberías como una alternativa eficiente para convertir dicha energía en electricidad, destinada a sistemas de monitoreo, sensores inteligentes o incluso para su integración en la red eléctrica local (Chen et al., 2013).

Entre las distintas configuraciones, las turbinas de arrastre, como la de tipo Savonius, resultan especialmente atractivas por su bajo costo de fabricación, simplicidad geométrica y viabilidad en tuberías de pequeño diámetro (Chen et al., 2013). No obstante, presentan limitaciones relacionadas con su bajo rendimiento, principalmente debido a la generación de torque negativo en los álabes de retorno y su alta sensibilidad frente a la dirección y velocidad del flujo (Tian et al., 2022; Bizhanpour et al., 2023).

Diversos estudios han demostrado que el uso de deflectores aguas arriba constituye una estrategia eficaz para mitigar el torque no deseado, y redirigir el flujo hacia los álabes que avanzan, mejorando así la eficiencia global del sistema (Altan and Atilgan, 2008; Golecha, Eldho and Prabhu, 2011; Payambarpour, Najafi and Magagnato, 2020).

Investigaciones recientes han evaluado una amplia gama de configuraciones, incluyendo deflectores fijos, pasivos, multicanal y mecanismos móviles ajustables, logrando incrementos en la eficiencia de entre 20 y 40% (Tian et al., 2022; Bizhanpour et al., 2023).

La geometría de deflectores de tipo “eye-shaped” (Fig. 2) propuesta por Chen et al. (2013) optimizada posteriormente por Hasanzadeh et al. (2021) y Bizhanpour et al. (2023), ha demostrado un desempeño sobresaliente en condiciones confinadas, al ofrecer un balance adecuado entre la redirección del flujo y la reducción de pérdidas de carga hidráulica. Por esta razón, se ha seleccionado esta geometría de deflector para el presente análisis.

El uso de deflectores no solo atenúa los efectos adversos del flujo sobre los álabes de retorno, sino que también incrementa el torque positivo en las palas adelantadas, maximizando el aprovechamiento de la energía cinética disponible. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo el analizar y cuantificar la influencia de un deflector tipo “eye shape” en la generación de torque de una turbina hidrocinética de arrastre instalada en tuberías. Para ello, se utilizaron las condiciones experimentales previamente reportadas por Hasanzadeh, Najafi and Riasi (2024),

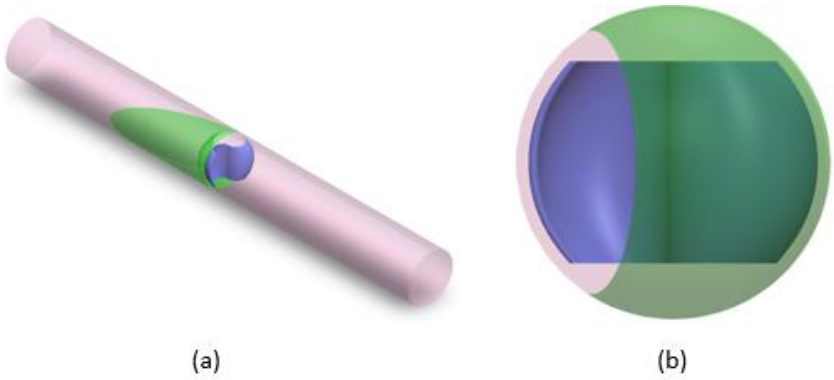


Fig. 1. Deflector en tubería (a) vista isométrica (b) vista lateral.

con el fin de contribuir al diseño y optimización de dispositivos para la micro generación de energía hidroeléctrica en aplicaciones de sistemas de energía distribuida.

2. GEOMETRÍA Y CONFIGURACIÓN DEL ESTUDIO.

El presente estudio se basa en la turbina vertical tipo *S-shaped* propuesta por Hasanzadeh et al. (2024), cuya geometría fue replicada como caso de referencia. Los detalles dimensionales se presentan en la Tabla 1 y su modelo tridimensional se ilustra en la Fig. 2. Esta turbina fue seleccionada por ser un diseño representativo para aplicaciones de microgeneración en tuberías con diámetros de 100 mm. Se evaluaron dos configuraciones principales: (i) turbina con deflector y (ii) turbina sin deflector. En ambos casos, se mantuvo constante la geometría del rotor, mientras que se variaron las velocidades de entrada del fluido. La presencia o ausencia del deflector permitió analizar su influencia en la generación de torque.

Tabla 1. Parámetros de diseño de la turbina.

D_0(mm)	D(mm)	d(mm)	t_0(mm)	H(mm)
100	92	46	3	64.4

3. MÉTODO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA.

3.1 Ecuaciones Gobernantes

Las ecuaciones que rigen el presente análisis corresponden a las ecuaciones de Reynolds promediadas en el tiempo (Reynolds Average Navier-Stokes, RANS), expresadas en forma cartesiana. Estas ecuaciones permiten modelar el comportamiento del flujo en componentes medias y fluctuantes:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \rho \overline{u_i' u_j'}\right] \qquad (2)$$

Donde $\overline{u_i}$ representa la componente media de velocidad en la dirección i, u_i' es la fluctuación turbulenta asociada, y $\overline{p}$ es la presión media. El término $-\rho\overline{u_i' u_j'}$ corresponde al tensor de esfuerzo de Reynolds, el cual representa la contribución de las fluctuaciones turbulentas al esfuerzo medio del fluido.

3.2 Configuración del módulo de solución y condiciones de frontera.

El análisis del campo de flujo alrededor de turbomáquinas representa un problema complejo de ingeniería, debido a la naturaleza tridimensional y altamente turbulenta del flujo. La simulación de su comportamiento requiere la implementación de modelos de turbulencia eficientes, capaces de capturar fenómenos como la generación de vórtices, la separación de capa límite y los elevados niveles de turbulencia presentes en estas aplicaciones. Entre los modelos de turbulencia más utilizados se encuentran los modelos de dos ecuaciones, como el κ-ε y el κ-ω, los cuales ofrecen un equilibrio adecuado entre precisión y costo computacional. El modelo κ-ε presenta un buen desempeño en flujos libres y en regiones alejadas de las paredes, mientras que el modelo κ-ω resulta más robusto en la región cercana a la pared, aunque presenta cierta sensibilidad a las condiciones de entrada (Menter, 1994).

Con el objetivo de aprovechar las ventajas de ambos enfoques, se empleó el modelo híbrido Shear Stress Transport (SST) κ-ω. Esta formulación combina la robustez del modelo κ-ω en las proximidades de las paredes con el buen comportamiento del modelo κ-ε en la región libre, lo cual permite una mejor predicción de los fenómenos de separación, recirculación y estancamiento, característicos en turbinas hidrocinéticas operando en condiciones confinadas dentro de tuberías (Menter, 1993; Kaltenbacher, Steinberger and Horn, 2020).

Las simulaciones se realizaron en régimen transitorio, utilizando un paso de tiempo dependiente de la velocidad de rotación de la turbina (Payambarpour and Najafi, 2020). Este paso de tiempo corresponde a un avance de 1° de rotación por iteración, lo que permite capturar adecuadamente la naturaleza cíclica del torque.

En cuanto a las condiciones de frontera, se impuso una velocidad uniforme en la entrada del dominio y una presión total promedio en la salida. Las superficies de los álabes de la turbina se modelaron como paredes rotatorias con velocidad de rotación constante determinada para cada caso de estudio, mientras que las paredes del conducto, tanto en las secciones de entrada como de salida, se definieron como superficies estacionarias con condición de no deslizamiento.

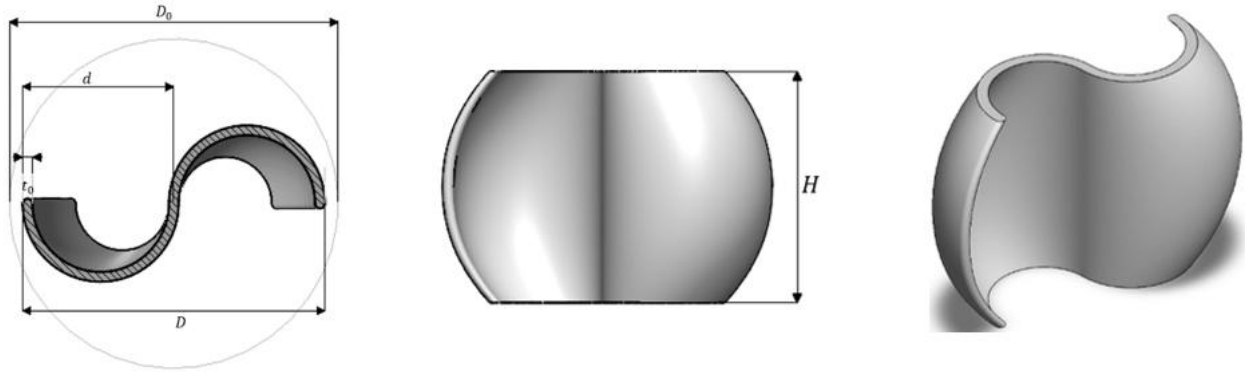


Fig. 2. Turbina tipo "S": (a) vista seccionada, (b) vista frontal, (c) vista isométrica.

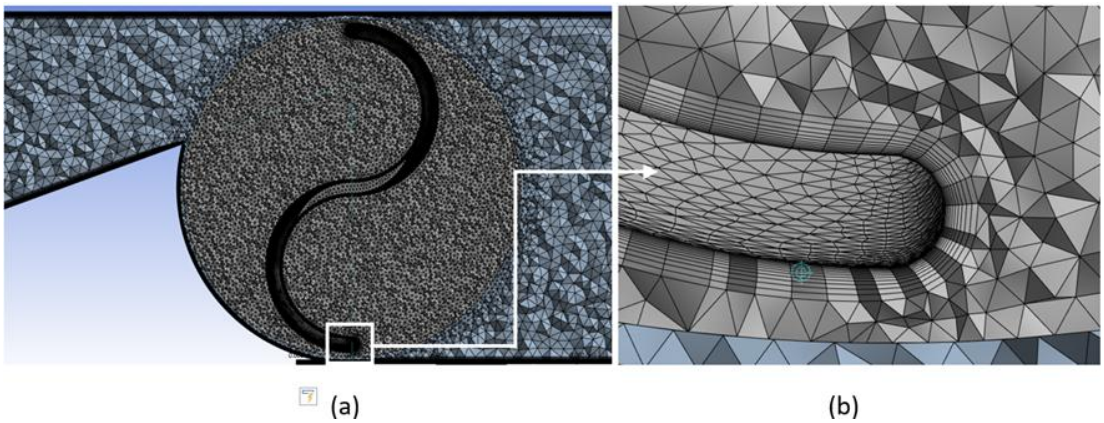


Fig. 3. Malla generada: (a) alrededor de la turbina, (b) capa prismática alrededor del álabe.

3.3 Generación de la malla computacional.

El análisis numérico se desarrolló mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) en el entorno de ANSYS FLUENT. La geometría y el dominio de simulación fueron construidos en SolidWorks 2023, mientras que el proceso de mallado se realizó en ANSYS *Meshing*.

Se empleó una combinación de elementos tetraédricos en el dominio general y capas prismáticas, con diez capas y un factor de crecimiento de 1.05, en las proximidades de las superficies sólidas. Este refinamiento permitió mantener los valores adimensionales de distancia de pared en el intervalo de $1 \leq y^{+} \leq 10$, cumpliendo con los requisitos del modelo de turbulencia para la resolución directa de la subcapa viscosa (*low-Re approach*). De este modo, se aplicó un tratamiento de pared totalmente resuelto (*near-wall resolution*), evitando el uso de funciones logarítmicas empíricas y asegurando una predicción precisa de los gradientes de presión y esfuerzo cortante. Esta configuración se muestra en la Fig. 3.

El dominio computacional fue dividido en dos regiones principales: un subdominio rotatorio, correspondiente al rotor de la turbina, y un subdominio estacionario, que incluye la tubería y el deflector. La interacción entre ambas regiones fue resuelta mediante la técnica de malla deslizante (Sliding Mesh), lo cual permite simular de forma precisa el movimiento relativo entre componentes móviles y estacionarios.

3.4 Verificación de la simulación numérica y criterio de convergencia.

Con el objetivo de garantizar la precisión y confiabilidad de las simulaciones numéricas, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo y los reportados en el estudio de referencia, bajo las mismas condiciones de operación. La Fig. 4 presenta la comparación de la variación temporal del torque generado por la turbina durante su operación, entre el modelo de referencia propuesto por Hasanzadeh et al. (2024) (a) y los resultados obtenidos en el modelo de validación (b). Se observa una concordancia general en la forma de las oscilaciones y en el comportamiento transitorio, con ambos modelos alcanzando un régimen estable a lo largo de la simulación. El torque medio obtenido en el modelo de validación fue de 0.125 N·m, mientras que el valor reportado por Hasanzadeh et al. (2024) fue de 0.135 N·m, lo que corresponde a una diferencia relativa del 7%. Esta diferencia se encuentra dentro del margen de error esperado para simulaciones numéricas CFD transitorias y puede atribuirse a mínimas diferencias en el refinamiento de malla, en la discretización de las condiciones de frontera, entre otros factores numéricos. Desde el punto de vista hidrodinámico, ambos modelos reproducen adecuadamente el intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido y el rotor. Por lo tanto, se concluye que el modelo numérico desarrollado en este trabajo tiene una validez satisfactoria, lo que permite su aplicación confiable en el análisis del desempeño y en la

evaluación comparativa de configuraciones con y sin deflector en etapas posteriores de la investigación.

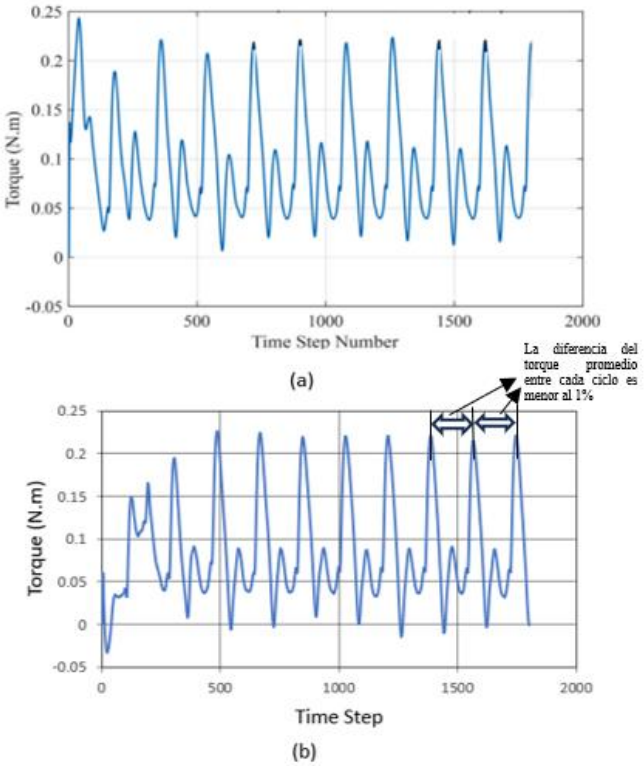


Fig. 4. Variación cíclica del torque producido por la turbina tipo Bach (a) Hasanzadeh et al. (2024); (b) Comportamiento replicado en este artículo.

Es fundamental asegurar que los resultados finales de las simulaciones se reporten una vez alcanzada la convergencia completa. Para ello, se analiza tanto el comportamiento cíclico de las variables representativas del rendimiento de la turbina, como lo es el torque instantáneo y su valor promedio en cada ciclo. En la Fig. 4 (b) se muestra la evolución del torque generado en función del número de pasos de tiempo, observándose que el ciclo se repite cada 180 pasos. Una vez que tanto la variación cíclica como el valor medio del torque permanecen constantes al continuar la simulación, el cálculo se finaliza y se reportan los valores correspondientes al último ciclo estabilizado.

4. RESULTADOS

Debido a las limitaciones inherentes a los ensayos experimentales, el uso de simulaciones CFD permitió analizar el desempeño de la turbina en diversos escenarios operativos. Al modelarse en régimen transitorio, se espera que tanto el torque como el caudal varíen a lo largo del tiempo, en función de la posición angular del rotor. Dado que la turbina cuenta con dos álabes, cada ciclo completo de variación se produce tras una rotación de 180°. El inicio y final de cada ciclo corresponden a la posición "A", la cual se encuentra representada en la Fig. 5.

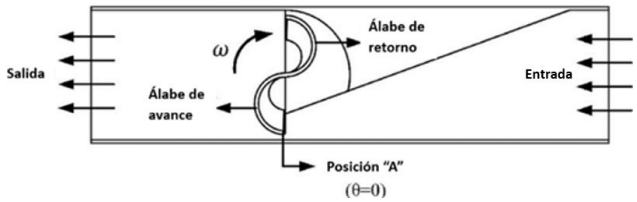


Fig. 5. Posición inicial de rotación establecida por Hasanzadeh et al. (2024).

La Fig. 6 muestra la variación del torque medio generado por la turbina tipo S en función de la velocidad de entrada del flujo de agua, considerando las configuraciones con y sin deflector. Los resultados evidencian que, en ambos casos, el torque aumenta con una tendencia lineal con la velocidad del flujo, aunque con pendientes distintas. Este comportamiento es consistente con el funcionamiento esperado de las turbinas de arrastre, en las cuales el momento generado es directamente proporcional al impulso del fluido incidente. No obstante, la magnitud del torque obtenido con la incorporación del deflector es considerablemente superior a lo largo de todo el intervalo de velocidades analizado, alcanzando valores aproximadamente cinco veces mayores en comparación con la configuración sin deflector, a la máxima velocidad del flujo de entrada simulada (1.16 m/s).

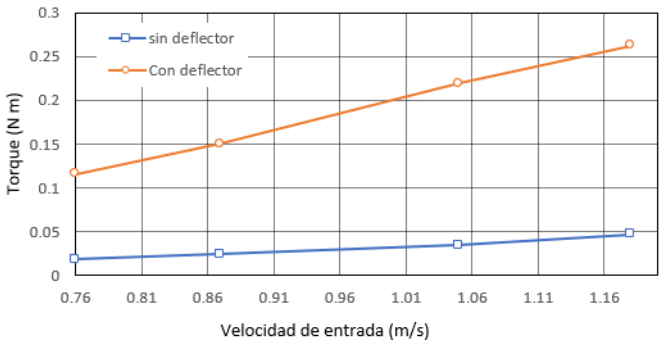


Fig. 6. Torque generado a diferentes velocidades de entrada.

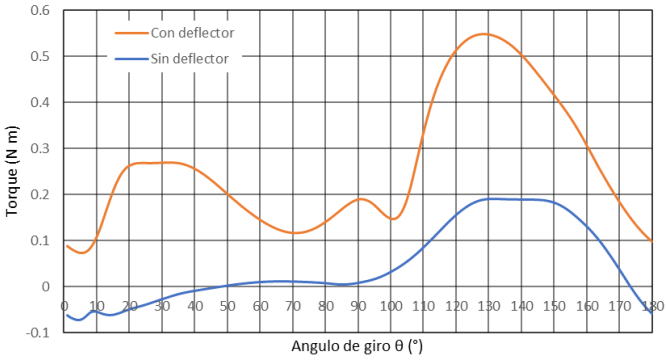


Fig. 7. Torque generado en un ciclo completo de rotación.

Con el objetivo de analizar con mayor detalle el comportamiento de la turbina durante un ciclo completo, en la Fig. 7 se grafica la magnitud del torque en función del ángulo de rotación de la turbina para ambos modelos. Esta representación permite observar que, para las cuatro velocidades de entrada consideradas, el torque promedio negativo desaparece al incorporar el deflector, manteniéndose únicamente valores positivos a lo largo del ciclo. En contraste,

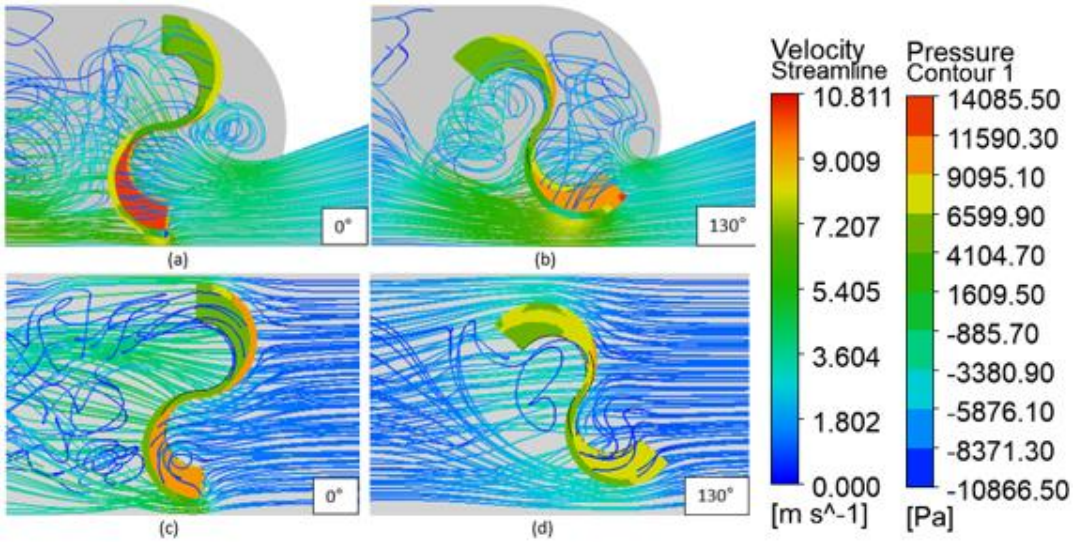


Fig. 8. Líneas de flujo a través de la turbina: (a) y (b) con deflector, (c) y (d) sin deflector.

la curva correspondiente a la configuración sin deflector presenta variaciones más suaves durante la rotación, lo que sugiere un régimen de operación más uniforme y menos susceptible a fluctuaciones, aunque con un torque significativamente inferior al alcanzado al instalar el deflector.

Para los casos en los que la turbina se evaluó sin el deflector, las velocidades de rotación equivalentes se calcularon a partir de las relaciones de velocidad de punta. Como resultado, se obtuvieron magnitudes de velocidad angular significativamente menores que las alcanzadas con el deflector instalado, lo que se traduce directamente en una menor potencia generada. En cuanto al torque generado (Fig. 7) se observa que el torque mínimo para ambos casos ocurre cuando la turbina se encuentra en una posición entre $\theta = 0°$ y 10°, casi al inicio del ciclo de rotación. De manera similar, el torque máximo se registra aproximadamente en $\theta = 130°$. Por estas razones, se realizó un análisis detallado de la interacción fluido-estructura utilizando las herramientas de post-procesado de ANSYS.

Bajo la suposición de que cada línea de flujo representa un porcentaje de flujo y, por ende, de masa que impacta directamente en los álabes de la turbina, se puede observar en la Fig. 8 (a) y (b) que, debido a los efectos del deflector para una posición de $\theta = 0°$, el flujo se acelera gradualmente hasta una velocidad aproximada de 4 m/s, justo antes de impactar en el álabe en avance. De acuerdo con la segunda ley de Newton, esto se traduce en una mayor fuerza resultante, y, por lo tanto, en un mayor torque generado. En contraste, en la configuración sin el deflector (Fig. 8 (b) y (c)), el fluido se mantiene a una velocidad promedio constante de 1.8 m/s antes de impactar en ambos álabes, tanto en la sección cóncava como en la convexa, lo que se traduciría en un torque positivo para el álabe en posición cóncava y un torque negativo para el álabe de superficie convexa.

En la Fig. 8 (b), correspondiente al punto de torque máximo, la presencia del deflector concentra el flujo en el extremo exterior del álabe en avance, intensificando el gradiente de presión positiva en su cara cóncava y reduciendo significativamente las zonas de recirculación aguas abajo. Este fenómeno incrementa el área efectiva de empuje y permite una transmisión de momento más eficiente. En contraste, en la configuración sin deflector (Fig. 8 (d)), las líneas de corriente presentan un patrón más difuso, con desprendimientos tempranos del flujo que reducen el esfuerzo tangencial neto sobre el rotor.

En conjunto, estas observaciones indican que el deflector no solo incrementa la magnitud del torque, sino que también modifica favorablemente la estructura del campo de flujo, potenciando la contribución del álabe en avance y reduciendo la interferencia del álabe de retorno. Esto se traduce en una mejora integral del desempeño hidrodinámico del sistema.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante simulación numérica transitoria demuestran que la incorporación de un deflector tipo “eye shape” mejora de manera significativa el desempeño hidrodinámico de la turbina S instalada en conductos presurizados. La instalación del deflector no solo incrementa la magnitud del torque medio en comparación con la configuración sin deflector, sino que también modifica de manera favorable la estructura del flujo incidente. Al concentrar la velocidad y la masa efectiva del fluido sobre el lado cóncavo del álabe en movimiento, este efecto genera un mayor gradiente de presión positiva sobre la superficie, reduciendo la presión en el álabe de retorno. En conjunto, estos resultados validan la efectividad de los deflectores como elementos pasivos de control de flujo, al mejorar el aprovechamiento energético de las turbinas hidrocinéticas en sistemas confinados y los consolida como una estrategia viable para la generación confiable de energía distribuida.

REFERENCIAS

Altan, B.D. and Atilgan, M., 2008. An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor. *Energy Conversion and Management*, [online] 49(12), pp.3425–3432. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2008.08.021.

Bizhanpour, A., Hasanzadeh, N., Najafi, A.F. and Magagnato, F., 2023. Investigation of different deflector geometry and mechanism effect on the performance of an in-pipe hydro Savonius turbine. *Applied Energy*, [online] 350, p.121697. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.121697.

Chen, J., Yang, H.X., Liu, C.P., Lau, C.H. and Lo, M., 2013. A novel vertical axis water turbine for power generation from water pipelines. *Energy*, 54, pp.184–193. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.064.

Golecha, K., Eldho, T.I. and Prabhu, S. V., 2011. Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine. *Applied Energy*, [online] 88(9), pp.3207–3217. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.03.025.

Hasanzadeh, N., Najafi, A.F. and Riasi, A., 2024. Study of blade type effect on the performance of drag-based in-pipe hydro-turbines for improving energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 314, p.118722. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.118722.

Hasanzadeh, N., Payambarpour, S.A., Najafi, A.F. and Magagnato, F., 2021. Investigation of in-pipe drag-based turbine for distributed hydropower harvesting: Modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 298, p.126710. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126710.

Kaltenbacher, S., Steinberger, M. and Horn, M., 2020. Pipe roughness identification of water distribution networks: The full turbulent case. *Applied Mathematical Modelling*, [online] 80, pp.879–894. https://doi.org/10.1016/J.APM.2019.11.011.

Menter, F.R., 1993. Zonal two equation κ-ω turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, 1993*. [online] https://doi.org/10.2514/6.1993-2906.

Menter, F.R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), pp.1598–1605. https://doi.org/10.2514/3.12149.

Payambarpour, S.A. and Najafi, A.F., 2020. Experimental and numerical investigations on a new developed Savonius turbine for in-pipe hydro application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 234(2), pp.195–210. https://doi.org/10.1177/0957650919854583.

Payambarpour, S.A., Najafi, A.F. and Magagnato, F., 2020. Investigation of deflector geometry and turbine aspect ratio effect on 3D modified in-pipe hydro Savonius turbine: Parametric study. *Renewable Energy*, 148, pp.44–59. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.12.002.

Tian, W., Bian, J., Yang, G., Ni, X. and Mao, Z., 2022. Influence of a passive upstream deflector on the performance of the Savonius wind turbine. *Energy Reports*, [online] 8, pp.7488–7499. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.05.244.

Exploration of Chaotic SPWM in Reconfigurable Systems: From Logistic Map to THD Analysis

Ochoa Sáenz, Hiram * **Lozoya Ponce, Ricardo Eliu** * **Martínez Montejano, Roberto Carlos** ** **Ontañon García, Luis Javier**** **Jiménez López Eduardo** ****

* *Tecnológico Nacional de México–Instituto Tecnológico de Chihuahua, Chihuahua, México, 31200. (e-mail: L19060760, ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx).*
** *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Estudios Profesionales Zona Media, C.P.79617 Rioverde, S.L.P. (e-mail: roberto.montejano@uaslp.mx)*
*** *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Coordinacion Académica, C.P. 78600, Salinas de Hidalgo, S.L.P. (e-mail: luis.ontanon@uaslp.mx)*
**** *Universidad Autónoma del Estado de México, Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población, C.P. 50000, Toluca, Edo. Mex. (e-mail: ejimenezl@uaemex.mx)*

Abstract: With the growing energy demand, various power converter applications have emerged that employ high-frequency controlled switching devices, primarily utilizing Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM). This work proposes the use of chaotic carrier signals generated through logistic maps implemented in Field Programmable Gate Arrays (FPGA), replacing conventional deterministic triangular carriers. The main objective is to improve the harmonic spectrum and reduce Total Harmonic Distortion (THD) in reconfigurable systems. The methodology leverages the pseudorandom nature of logistic maps to disperse harmonic spectral content, preventing energy concentration at specific frequencies. The implementation in FPGA facilitates real-time generation of chaotic sequences with high temporal resolution and reconfiguration flexibility. Chaotic dynamics are characterized by their sensitivity to initial conditions and deterministic yet unpredictable behavior, which makes them particularly suitable for spreading the harmonic content across a wider frequency range. The logistic map, defined by its iterative nonlinear equation, generates sequences that appear random while being entirely deterministic, providing reproducibility and controllability essential for practical applications. By modulating the pulse width using these chaotic carriers instead of traditional periodic triangular waveforms, the resulting switching patterns exhibit reduced spectral peaks and more uniform energy distribution. A comparative analysis of THD between conventional SPWM techniques and the proposed chaotic carrier approach is performed, evaluating performance in devices operating at medium and high switching frequencies. The reconfigurable nature of FPGA platforms allows for parameter tuning and optimization without hardware modifications, facilitating the exploration of different chaotic regimes and their effects on harmonic spectra. This study represents an advance in power electronics by incorporating chaos theory into modulation technique test beds, offering potential benefits in carrier signal analysis to evaluate compliance with industry standards.

Keywords: FPGA, Multilevel Converter, Logistic Map, THD.

1 INTRODUCCIÓN

Los inversores multinivel (MLI) se han consolidado como elementos esenciales en aplicaciones industriales y de alta potencia por su elevada eficiencia y baja distorsión armónica (Sarker, 2020; Lin et al., 2024). Su capacidad para generar formas de onda de alta calidad y reducir el estrés sobre los dispositivos semiconductores los convierte en una tecnología clave en la conversión de energía eléctrica. No obstante, la presencia de armónicos y la interferencia electromagnética (*EMI*) continúan siendo desafíos relevantes.

El desempeño de estos convertidores depende fuertemente de la estrategia de modulación empleada. La modulación sinusoidal por ancho de pulso (*SPWM*) destaca por su simplicidad y linealidad, pero concentra la energía armónica alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos, lo que incrementa el *THD* y los problemas de *EMI* (Niu

and Cai, 2024). Técnicas avanzadas como *Phase Disposition PWM* (*PD-PWM*) han demostrado reducir el *Weighted THD* (*WTHD*) en inversores *Neutral Point Clamped* (*NPC-MLI*) (Sarker, 2020), aunque aún presentan concentración espectral en bandas definidas.

Ante estas limitaciones, se han explorado técnicas de modulación no determinísticas, especialmente aquellas basadas en señales caóticas, como alternativa eficaz para dispersar el espectro armónico y mitigar la *EMI*. Tse et al. (Tse et al., 2003) demostraron experimentalmente que la inserción de portadoras caóticas en la generación *PWM* redistribuye la energía espectral y atenúa los picos armónicos sin comprometer la eficiencia. Trabajos más recientes han extendido estos principios a plataformas digitales, utilizando implementaciones reconfigurables en *FPGA* (Lin et al., 2024).

Lin et al. (Lin et al., 2024) propusieron una estrategia de control caótico que combina la modulación del ángulo de fase del portador con *CPS-SPWM*, logrando una disminución del *THD* del 4.99 % al 2.62 % en un inversor *CHB* de siete niveles. De manera complementaria, la modulación de frecuencia caótica (*Chaotic Carrier-Frequency Modulation*) mediante mapas logístico y tent transforma los picos discretos en un espectro continuo, reduciendo la *EMI* con un ligero incremento del rizado de salida (Niu and Cai, 2024).

La teoría del caos, caracterizada por su sensibilidad a las condiciones iniciales y exponentes de Lyapunov positivos, proporciona un marco sólido para generar secuencias pseudoaleatorias de alta entropía aplicables al control y la modulación de potencia (Moysis et al., 2020). El mapa logístico, por su simplicidad y riqueza dinámica, constituye un generador idóneo para este propósito.

En este trabajo se propone una exploración sistemática del uso del mapa logístico como fuente de portadoras caóticas en la modulación *SPWM*, implementada en una plataforma *FPGA*. A diferencia de los esquemas convencionales, se desarrolla un banco de pruebas a nivel de señal donde las salidas *PWM* se combinan mediante amplificadores operacionales para sintetizar una onda senoidal. Este enfoque permite analizar experimentalmente la influencia de los parámetros del mapa logístico (ρ y x_0) sobre el THD, estableciendo las bases para futuras aplicaciones en inversores multinivel de potencia.

1.1 Mapas Caóticos y Aplicación en Modulación SPWM

El mapa logístico (*Logistic Map*) se define mediante la ecuación:

$$x_{n+1} = \rho\, x_n(1 - x_n), \tag{1}$$

exhibiendo comportamiento caótico para $\rho > 3.57$ (Niu and Cai, 2024). La Figura 1 muestra su evolución temporal para $\rho = 3.2$, donde el sistema converge a un ciclo de período 2.

El *Tent Map* ofrece una distribución uniforme de valores, adecuada para esquemas *CDPWM* (Chaotic Discontinuous PWM), mientras que el *Triangular Chaotic Map* (Maqableh, 2015) presenta una dinámica caótica más completa, ideal para modulaciones *SPWM* reconfigurables.

1.2 PWM Caótico (CDPWM)

En la técnica *CDPWM*, el contador base N del modulador se reemplaza por una secuencia caótica x_n, con el fin de dispersar el espectro de conmutación. El nuevo contador se expresa como:

$$N'_c = x_n\, \mathcal{R}_e + N, \tag{2}$$

donde el parámetro $\mathcal{R}_e$ ajusta el compromiso entre reducción de EMI y estabilidad del voltaje de salida (Niu and Cai, 2024).

1.3 Métricas de Distorsión

El análisis de distorsión armónica se realiza mediante el *Total Harmonic Distortion* (THD) y su versión ponderada (*Weighted THD*, WTHD), la cual considera la influencia relativa de los armónicos según la frecuencia y el efecto sobre el filtrado. La reducción del WTHD en esquemas *PD–PWM* y *CDPWM* puede evaluarse a través del análisis de Fourier y simulaciones digitales implementadas en *FPGA* mediante Verilog.

1.4 Generación de Bits Pseudoaleatorios

La extracción de múltiples bits por iteración a partir de la parte decimal de los mapas caóticos permite generar secuencias pseudoaleatorias que modifican dinámicamente la comparación portadora–referencia en el esquema *SPWM*. Estas secuencias, implementadas en *FPGA*, posibilitan el estudio del efecto del comportamiento caótico sobre la dispersión espectral y la reducción del *THD*. Además, la alta entropía y estabilidad temporal reportadas en trabajos previos (Moysis et al., 2020) respaldan su idoneidad para la modulación caótica en sistemas reconfigurables.

1.5 Comportamiento Dinámico del Mapa Logístico

El comportamiento del sistema depende críticamente del valor del parámetro ρ, presentando distintas regiones dinámicas como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Regiones de comportamiento dinámico del mapa logístico

Rango de ρ	**Comportamiento del sistema**
$0 < \rho < 1$	Extinción (convergencia a cero)
$1 < \rho < 3$	Punto fijo estable
$\rho = 3$	Primera bifurcación
$3 < \rho < 3.44949$	Oscilaciones periódicas (período 2)
$3.44949 < \rho < 3.54409$	Oscilaciones periódicas (período 4)
$3.54409 < \rho < 3.56995$	Bifurcaciones sucesivas (ruta al caos)
$\rho > 3.56995$	Régimen caótico
$\rho = 4$	Caos completo

Nota: Los valores críticos corresponden a puntos de bifurcación donde el sistema cambia cualitativamente su dinámica. La región $3.56995 < \rho < 4$ contiene ventanas periódicas intercaladas con comportamiento caótico.

La transición del régimen ordenado al caótico sigue una ruta de duplicación de período, característica de los sistemas no lineales. Para la modulación *PWM*, la región

caótica ($\rho > 3.57$) resulta de especial interés debido a sus propiedades de espectro continuo y sensibilidad a las condiciones iniciales, que contribuyen a la dispersión armónica en la señal modulada (Maqableh, 2015).

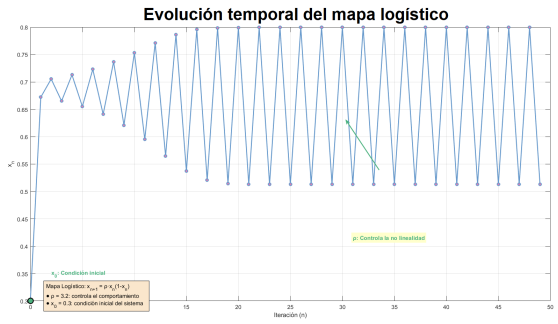


Fig. 1. Evolución temporal del mapa logístico ($\rho = 3.2$ y $x_0 = 0.3$).

La Figura 2 presenta el diagrama de telaraña correspondiente, ilustrando la convergencia al ciclo estable mediante su construcción geométrica. Por su parte, la Figura 3 muestra la distribución de probabilidad de estados del mapa logístico, obtenida tras múltiples iteraciones, la cual refleja la frecuencia relativa con que el sistema visita cada región del espacio de estados.

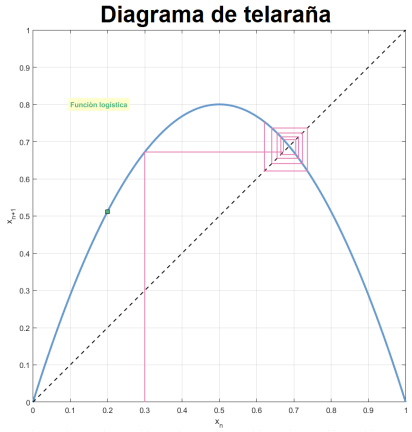


Fig. 2. (a) Diagrama de telaraña ($\rho = 3.2$).

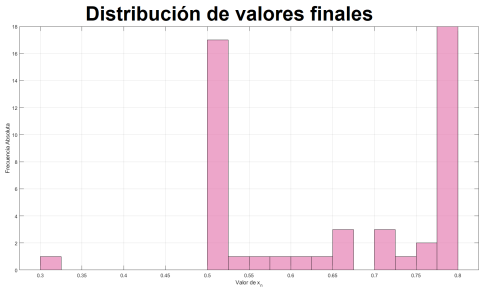


Fig. 3. (b) Distribución de probabilidad de estados ($\rho = 3.2$).

2 MARCO TEORICO

2.1 Modulación SPWM Convencional

La modulación por ancho de pulso sinusoidal (*SPWM*) es una de las estrategias más empleadas en inversores debido a su simplicidad y facilidad de implementación. El principio fundamental consiste en comparar una señal de referencia sinusoidal $v_{ref}(t)$ con una señal portadora triangular de alta frecuencia $v_{tri}(t)$ Sarker (2020):

$$v_{ref}(t) = M_a V_{dc} \sin(2\pi f_0 t) \tag{3}$$

donde M_a es el índice de modulación en amplitud ($0 \leq M_a \leq 1$) y f_0 es la frecuencia fundamental (típicamente 60 Hz en sistemas industriales). El índice de modulación en frecuencia se define como:

$$M_f = \frac{f_c}{f_0} \tag{4}$$

donde f_c es la frecuencia de la señal portadora triangular.

La señal PWM resultante se define mediante la comparación:

$$S(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } v_{ref}(t) \geq v_{tri}(t) \\ 0, & \text{si } v_{ref}(t) < v_{tri}(t) \end{cases} \tag{5}$$

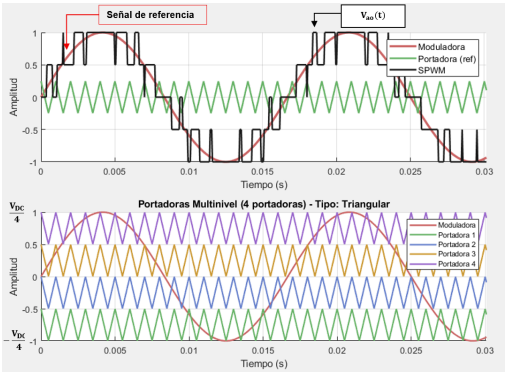


Fig. 4. Generación de *SPWM* multinivel: $v_{\text{ref}}(t)$ comparada con 4 portadoras para sintetizar $V_{ao}(t)$ de 5 niveles.

Esta comparación determina los instantes de conmutación de los dispositivos semiconductores, generando pulsos modulados que permiten aproximar una onda senoidal en la salida del inversor tras el proceso de filtrado.

El espectro armónico de *SPWM* convencional presenta picos discretos concentrados en la frecuencia portadora f_c y sus bandas laterales $f_c \pm kf_0$, donde $k = 1, 2, 3, \ldots$ Este patrón de concentración energética es la principal limitación de la técnica convencional, generando problemas de *EMI* y *THD* elevado Niu and Cai (2024).

El espectro armónico de *SPWM* convencional presenta picos discretos en:

- Frecuencia portadora: f_c
- Bandas laterales: $f_c \pm kf_0$, donde $k = 1, 2, 3, \ldots$

2.2 SPWM Caótico (CSPWM)

La modulación *PWM* caótica reemplaza la portadora triangular determinística por una secuencia caótica generada mediante el mapa logístico. Niu et al. Niu and Cai (2024) describen que el contador constante N se sustituye por una secuencia caótica N_c, modulando la frecuencia de conmutación según:

$$N_c = x_n \cdot R_e + N_0 \tag{6}$$

donde R_e representa el grado de modulación, controlando la amplitud del espectro y el nivel de rizado de salida, y N_0 es el valor base del contador. Este parámetro permite establecer un equilibrio entre la reducción de *EMI* y la estabilidad del voltaje de salida.

La principal ventaja de utilizar portadoras caóticas radica en que la naturaleza pseudoaleatoria de la secuencia dispersa el contenido espectral armónico a lo largo de un rango de frecuencias más amplio, en lugar de concentrarlo en bandas específicas como ocurre con la *SPWM* convencional Lin et al. (2024). Esta dispersión espectral resulta en una reducción de los picos de *EMI* y, potencialmente, en una disminución del *THD*.

3 METODOLOGÍA

La metodología experimental se desarrolló en tres etapas consecutivas: (1) análisis y caracterización del mapa logístico mediante simulación, (2) implementación digital en *FPGA*, y (3) validación experimental con banco de pruebas analógico multinivel.

3.1 Caracterización del Mapa Logístico mediante Simulación

Se desarrolló una interfaz gráfica en MATLAB para el análisis paramétrico del mapa logístico (Ecuación 1). La herramienta permite variar interactivamente ρ (parámetro de bifurcación) y x_0 (condición inicial), generando en tiempo real: (a) diagrama de bifurcación, (b) evolución temporal, y (c) histograma de distribución.

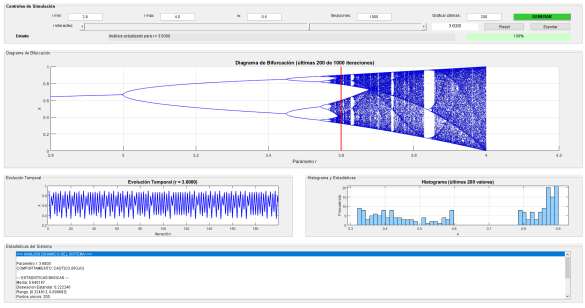


Fig. 5. Interfaz gráfica para análisis del mapa logístico mostrando: diagrama de bifurcación para identificación de regiones caóticas, evolución temporal de la serie, e histograma de distribución verificando ergodicidad de la secuencia generada.

El diagrama de bifurcación se construyó iterando la ecuación del mapa para $\rho \in [2.5, 4.0]$ con incrementos de 0.001, descartando las primeras 500 iteraciones (transitorios) y graficando las siguientes 200 para visualizar atractores. Este análisis permitió seleccionar configuraciones óptimas en la región caótica ($\rho \in \{3.6, 3.9, 4.0\}$) y de transición ($\rho \in \{3.0, 3.2\}$) para evaluación comparativa posterior. El histograma de distribución confirma la ergodicidad de la secuencia, característica fundamental para aplicaciones de modulación *PWM* caótica Moysis et al. (2020).

3.2 Implementación Digital en FPGA

El mapa logístico fue implementado en la *FPGA Cyclone V 5CSEMA5F31C6* mediante aritmética de punto fijo (12 bits fraccionarios), conforme a la ecuación (1). Su ejecución se divide en tres etapas: cálculo de $(1-x_n)$, multiplicación ρx_n y producto final. El sistema opera con reloj principal de 50 MHz, dividido para obtener una frecuencia *PWM* de 763 Hz. La Figura 6 muestra la arquitectura implementada, donde el módulo `MAPA_LOGISTICO` genera la señal x_{out} a partir de los parámetros `alpha_sel` (ρ) y `x0_sel`, la cual es procesada por `PWM_DAC` y `BIT_MUX` para producir las salidas PWM y serie utilizadas en las pruebas.

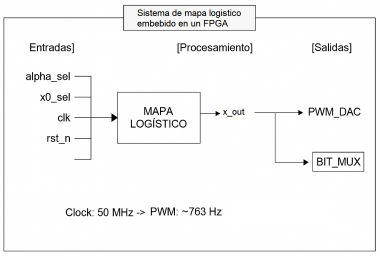


Fig. 6. Arquitectura del sistema FPGA para generación del mapa logístico.

3.2.1 Utilización de Recursos

La implementación resultó altamente eficiente, utilizando menos del 1% de los recursos lógicos disponibles (Tabla 3), permitiendo integración futura de funcionalidades adicionales sin restricciones de hardware.

Tabla 2. Recursos *FPGA* y Parámetros Operativos

Tabla 3. Recursos FPGA

Recurso	Utilizado	Disponible	%
ALMs	150	32,070	< 1
Registros	120	64,140	< 1
Bloques DSP	2	87	2
Pines I/O	37	457	8

Tabla 4. Parámetros Operativos

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia sistema	50	MHz
Frecuencia PWM	763	Hz
Resolución	12	bits
Rango ρ	3.0 – 4.0	—
Rango x_0	0.00 – 0.99	—
Tiempo convergencia	< 2	s

3.3 Banco de Pruebas Experimental

3.3.1 Configuración del Sistema

La plataforma de validación experimental (Figura 7) integra tres componentes principales: (1) FPGA DE1-SoC implementando el generador caótico, (2) generador de señales UTG962E para portadoras convencionales (triangular, sinusoidal, cuadrada a 1 kHz), y (3) osciloscopio digital para análisis temporal y espectral. Esta configuración permite

comparación directa entre técnicas de modulación convencional y caótica bajo condiciones idénticas de operación.

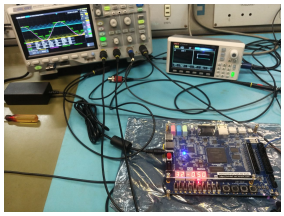


Fig. 7. Configuración experimental: FPGA, generador de portadoras y osciloscopio.

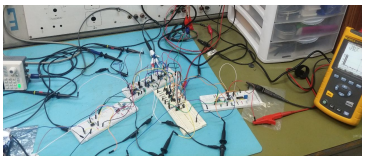


Fig. 8. Sistema analógico: generación de portadoras y comparación multinivel.

3.3.2 Implementación de SPWM Multinivel Analógico

El sistema SPWM multinivel fue implementado en protoboard utilizando amplificadores operacionales, comprendiendo dos etapas:

Generación de portadoras con offset: Las portadoras convencionales se generaron con el UTG962E, mientras que la portadora caótica se obtuvo desde la FPGA. Los niveles de offset se implementaron en el sistema analógico *SPWM* mediante amplificadores operacionales en configuración sumadora, permitiendo posicionar cada portadora en el rango de tensión correspondiente para la síntesis de cinco niveles.

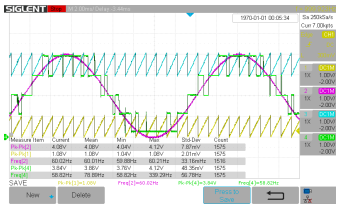


Fig. 9. Cuatro portadoras triangulares con offset vertical calibrado para establecer umbrales de conmutación uniformes.

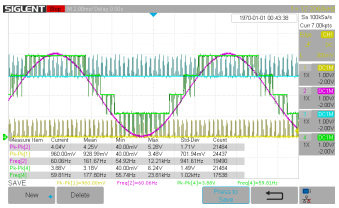


Fig. 10. Comparación simultánea moduladora-portadoras y síntesis de señal multinivel de 5 niveles.

Comparación y síntesis multinivel: La señal moduladora sinusoidal (60 Hz) generada por Tektronix CFG280 se comparó simultáneamente con las cuatro portadoras mediante comparadores de lazo abierto implementados con amplificadores operacionales. Cada comparador genera una señal digital al cruzar la moduladora su respectiva portadora. La combinación lógica de estas señales produce los pulsos *PWM* que sintetizan la salida multinivel de 5 niveles.

Tabla 5. Configuración del sistema analógico SPWM

Componente	Valor
UA741CN	—
LM339	—
R_1	10 kΩ
R_2	100 kΩ
R_3	500 Ω
R_4	1 MΩ

3.3.3 Instrumentación y Mediciones

Las mediciones de *THD* se realizaron con el analizador monofásico Fluke 43B, capaz de evaluar armónicos hasta el 51.º, conforme a los requisitos establecidos en la norma IEC 61000-4-7. El análisis se efectuó directamente sobre la señal de salida del sistema SPWM bajo condiciones experimentales idénticas de modulación (índice de modulación y frecuencia fundamental de 60 Hz). Se consideraron siete configuraciones del mapa logístico (variando ρ y x_0) y tres portadoras convencionales (triangular, sinusoidal y cuadrada), totalizando diez escenarios de prueba.

4 RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

4.1 Evaluación de THD: Portadora Caótica vs. Convencional

La evaluación del *THD* se realizó conforme a los criterios de calidad establecidos por la norma IEEE 519, empleando los registros obtenidos con el analizador Fluke 43B. La Tabla 6 resume los resultados experimentales para las diferentes configuraciones de portadora.

Tabla 6. THD obtenido con diferentes configuraciones del mapa logístico

Configuración	ρ	x_0	THD (%)
Cuadrada	—	—	21.1
Triangular	—	—	**8.6**
Sinusoidal	—	—	9.9
Mapa logístico config_1	3.0	0.50	18.1
Mapa logístico config_2	3.2	0.50	18.2
Mapa logístico config_3	3.6	0.50	17.4
Mapa logístico config_4	3.9	0.50	17.5
Mapa logístico config_5	4.0	0.50	17.6
Mapa logístico config_6	4.0	0.70	17.3
Mapa logístico config_7	**4.0**	**0.99**	**17.2**

La portadora triangular convencional presentó el mejor desempeño (THD = 8.6%), mientras que las configuraciones caóticas mostraron valores en el rango 17.2%-18.2%. La configuración óptima caótica ($\rho = 4.0$, $x_0 = 0.99$) alcanzó THD = 17.2%, aproximadamente el doble del valor convencional. El análisis paramétrico reveló que incrementar ρ hacia comportamiento totalmente caótico y seleccionar condiciones iniciales extremas minimiza el THD dentro del régimen caótico.

Las Figuras 11 y 12 muestran los espectros armónicos medidos. La portadora triangular exhibe picos discretos concentrados en los armónico cercanos a la frecuencia de conmutación. Sarker (2020). En contraste, la portadora caótica dispersa la energía sobre un espectro continuo sin picos prominentes, evidenciando el esparcimiento espectral del mapa logístico Moysis et al. (2020).

Este resultado refleja características diferenciadas de ambas técnicas: la portadora triangular genera armónicos determinísticos y periódicos, mientras que la caótica dispersa energía sobre un espectro amplio, resultando en mayor THD medido. Aunque esta dispersión incrementa el *THD*, es favorable para mitigación de *EMI* y reducción de resonancias armónicas en componentes de potencia Niu and Cai (2024), aspectos no capturados por la métrica de *THD* convencional.

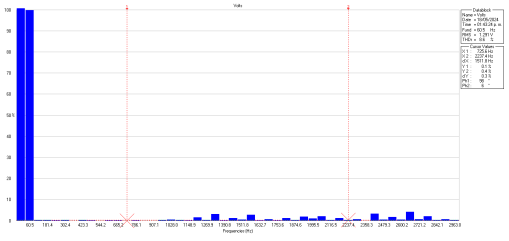


Fig. 11. Espectro armónico para *SPWM* con portadora triangular (THD = 8.6%). Se observa concentración de energía en armónicos discretos de baja frecuencia.

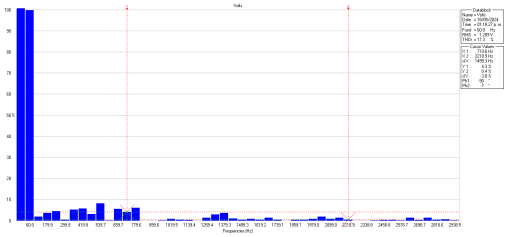


Fig. 12. Espectro armónico para *SPWM* con portadora caótica ($\rho = 4.0$, $x_0 = 0.99$, THD = 17.2%). Se observa dispersión espectral uniforme característica del comportamiento caótico.

5 CONCLUSIONES

La implementación de *SPWM* caótico basado en el mapa logístico reveló resultados que contrastan con las expectativas iniciales. Las configuraciones caóticas presentaron *THD* superior (17.2%-18.2%) comparado con portadora triangular (8.6%) y sinusoidal (9.9%). La mejor configuración ($\rho = 4.0$, $x_0 = 0.99$) alcanzó 17.2% de THD, aproximadamente el doble de la técnica convencional.

Estos resultados deben interpretarse considerando que el *THD* no captura completamente las ventajas potenciales de la modulación caótica. La literatura reporta beneficios significativos en distribución espectral uniforme, mitigación de *EMI*, reducción de resonancias armónicas y mejor compatibilidad electromagnética Lin et al. (2024); Song et al. (2019); Niu and Cai (2024). No obstante, para aplicaciones con requisitos estrictos de calidad de energía (IEEE 519-2014) Holtz (1992), el *THD* observado (> 17%) excede ampliamente el límite típico de 5%, haciendo inviable esta técnica sin filtrado más robusto o mayor número de niveles Kabalci (2021).

El análisis paramétrico mostró que incrementar ρ hacia comportamiento totalmente caótico ($\rho = 4.0$) y seleccionar condiciones iniciales extremas ($x_0 = 0.99$) optimizó el desempeño Maqableh (2015); Moysis et al. (2020). Las limitaciones identificadas incluyen: (1) restricciones del DAC embebido en velocidad y resolución que distorsionan las transiciones caóticas rápidas, (2) degradación de propiedades estadísticas por cuantización temporal, y (3) resolución multinivel insuficiente (5 niveles) para aprovechar el esparcimiento espectral caótico.

6 TRABAJO FUTURO

Para superar estas limitaciones se propone: (1) integración de DAC externos de alta velocidad (>100 MSPS, 16 bits) con interfaz I2C/SPI Niu and Cai (2024), (2) exploración de sistemas caóticos alternativos (Hénon, Lorenz, hipercaóticos) Maqableh (2015), (3) escalamiento a inversores de 7-9 niveles Gupta and Bhatnagar (2018); Kabalci (2021), y (4) caracterización electromagnética completa mediante análisis de espectro y mediciones de *EMI* según estándares CISPR Song et al. (2019).

Este trabajo estableció una metodología experimental rigurosa y una plataforma reconfigurable flexible para evaluación de técnicas *SPWM* avanzadas Bose (2002), proporcionando las bases para investigaciones futuras que consideren múltiples métricas complementarias (*THD*, *EMI*, eficiencia) en la evaluación de modulación caótica aplicada a electrónica de potencia.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al SECIHTI la beca otorgada (CVU: 2031049) y al TecNM el apoyo institucional brindado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Bose, B.K. (2002). *Modern power electronics and AC drives*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Gupta, K.K. and Bhatnagar, P. (2018). *Multilevel inverters: conventional and emerging topologies and their control*. Academic Press, London.

Holtz, J. (1992). Pulsewidth modulation—a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(5), 410–420. doi:10.1109/41.161472.

Kabalci, E. (ed.) (2021). *Multilevel inverters: introduction and emergent topologies*. Academic Press, London.

Lin, D., Luo, D., Huang, G., Chen, Y., and Li, T. (2024). Research on control method of multilevel inverter based on chaotic modulation. In P. Siano and W. Zhao (eds.), *Ninth International Symposium on Advances in Electrical, Electronics, and Computer Engineering (ISAEECE 2024)*, 294. SPIE, Changchun, China. doi:10.1117/12.3034432. URL `https://doi.org/10.1117/12.3034432`.

Maqableh, M. (2015). A novel triangular chaotic map (tcm) with full intensive chaotic population based on logistic map. *Journal of Software Engineering and Applications*, 8, 635–659. doi:10.4236/jsea.2015.812059. URL `https://doi.org/10.4236/jsea.2015.812059`.

Moysis, L., Tutueva, A., Volos, C., and Butusov, D. (2020). A chaos-based pseudo-random bit generator using multiple digits comparison. *Chaos Theory and Applications*, 2(2), 58–68.

Niu, J. and Cai, Z. (2024). Design of a chaotic carrier frequency modulation switched-mode power supply controller based on fpga. In *2024 2nd China Power Supply Society Electromagnetic Compatibility Conference (CPEMC)*, 1–6. IEEE. doi:10.1109/CPEMC65359.2024.00023. URL `https://doi.org/10.1109/CPEMC65359.2024.00023`.

Sarker, R. (2020). Phase disposition pwm technique to minimize wthd from a three-phase npc multilevel voltage source inverter. Unpublished manuscript.

Song, Y., Niu, J., and Li, Z. (2019). Chaos versus emi: methodologies and practice. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 29(12), 1930033. doi:10.1142/S0218127419300337.

Tse, K.K., Ng, R.W.M., Chung, H.S.H., and Hui, S.Y.R. (2003). An evaluation of the spectral characteristics of switching converters with chaotic carrier-frequency modulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(1), 171–182. doi:10.1109/TIE.2002.807659.

High-efficiency resonant DCX transformer DC-DC converter

Vázquez Albarrán, Emiliano*, Aguilar Castillo, Carlos **, de León Aldaco, Susana Estefany***

Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)

(email: {m24ce078, carlos.ac, susana.da}@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: This paper presents the design and simulation verification of a high-efficiency resonant DC-DC converter with a DCX transformer. It does not propose a new topology but rather verifies calculations and checks the efficiency of the system. It starts with an LLC tank that is simplified to a series LC to obtain closed gain and impedance relationships, thereby dimensioning the components under the desired operating conditions. The design criteria ensure smooth switching behavior with a quality factor of 5. The simulations confirm nearly in-phase waveforms in the tank and an efficiency of 95%, confirming the effectiveness of the model, which is limited mainly by losses in semiconductors and rectification. Overall, the results confirm that using the formulas and procedure described in this paper allows for the design of a compact, efficient, and replicable resonant DCX transformer.

Keywords: DCX transformer, soft switching, DC-DC converter, resonance.

1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía limpias como la solar y la eólica depende fundamentalmente de la capacidad de convertir eficientemente la energía producida de corriente directa (CD) a corriente alterna (AC). Estas fuentes de energía renovables producen electricidad en forma de corriente continua: los paneles solares convierten la luz solar en corriente continua y los sistemas de almacenamiento, como las baterías, también funcionan con corriente continua (Cao et al., 2024, Dhanamjayulu, 2021). Sin embargo, la mayoría de los electrodomésticos industriales y domésticos, así como las redes eléctricas, funcionan con corriente alterna. Esto requiere el uso de convertidores de potencia, especialmente inversores, para convertir la corriente continua en corriente alterna con la eficiencia y estabilidad requeridas (Moreta et al., 2021).

Es bien conocida la contribución de los inversores multinivel. Estos inversores proporcionan una salida de tensión multinivel con forma sinusoidal, lo que reduce significativamente la distorsión armónica total (THD) (Moreta et al., 2021). Además, se optimizan los niveles de eficiencia energética y se reducen las pérdidas por conmutación, lo que es un aspecto clave para integrar energía limpia en la red. Estas características pueden mejorar la calidad de la energía y facilitar la interoperabilidad con los estándares de transmisión y distribución para la generación de energía renovable y los sistemas de CA (Peng et al., 2021).

Para el funcionamiento adecuado de los inversores multinivel, se requiere el uso de múltiples fuentes externas de DC, especialmente en topologías como el inversor multinivel de puente H en cascada (CHB), donde cada módulo necesita una fuente de alimentación independiente. Es aquí donde el transformador DCX (Direct Current Transformer) se presenta como una opción viable y eficaz. Los transformadores DCX permiten la transferencia de energía en corriente directa con aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, proporcionando múltiples tensiones de salida, si se desea, desde una única fuente de entrada (Toubal et al., 2021).

Esto facilita la alimentación de los módulos de los inversores multinivel sin necesidad de fuentes externas adicionales para cada módulo, simplificando así el diseño del sistema (Ceglia et al., 2011).

2. MARCO TEÓRICO

El transformador DCX surge como una solución eficiente para superar los problemas relacionados con las fuentes auxiliares en inversores multinivel. Los transformadores DCX son dispositivos de conversión de corriente directa a corriente directa (CD-CD) que operan a alta frecuencia, proporcionando aislamiento galvánico y alta eficiencia, también pueden ser controlados mediante modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) (Moreta et al., 2021). Estas características los hacen ideales para aplicaciones que requieren múltiples niveles de tensión, reduciendo el número de fuentes independientes necesarias y simplificando el diseño del sistema (Trabelsi et al., 2021). Además, el uso de conmutación suave, como Zero Voltage Switching (ZVS) y Zero Current Switching (ZCS), ayuda a minimizar las pérdidas por conmutación, mejorando así la eficiencia general del inversor multinivel (Okutani et al., 2021).

El transformador DCX utiliza un tanque resonante para operar con conmutación. Este tanque está compuesto por una combinación de elementos inductivos y capacitivos que se encargan de moldear la transferencia de energía permitiendo que el sistema funcione en condiciones cercanas a la resonancia. Gracias a esta característica es posible reducir las pérdidas por conmutación y mejorar el rendimiento del sistema lo que lo hace especialmente útil en aplicaciones de alta frecuencia como los transformadores DCX (Czyz et al., 2022, Gadelrab, 2021). Las topologías resonantes más comunes son la LLC, CLLC y LCC y cada una tiene características particulares que permiten un control más preciso de la

ganancia, un mejor comportamiento frente a variaciones de carga, o una mejor respuesta dinámica (Czyz et al., 2022, Li, 2022). En particular la topología LLC ha demostrado alcanzar eficiencias cercanas al 98% en prototipos compactos diseñados para servidores y sistemas distribuidos, lo que la convierte en una opción atractiva para alimentar inversores multinivel desde una sola fuente aislada (Gadelrab et al., 2021, Li, 2022).

La conmutación suave, en sus dos formas más comunes las cuales son ZVS y ZCS es una técnica ampliamente utilizada en convertidores resonantes debido a su capacidad para reducir significativamente las pérdidas durante los procesos de encendido y apagado de los dispositivos de conmutación. En ZVS, el interruptor se activa cuando la tensión a través de él es prácticamente cero mientras que en ZCS se apaga cuando la corriente que circula por el dispositivo es mínima o nula. Esto evita los cruces de corriente y tensión que generan picos de potencia instantánea y que son responsables de gran parte del calor disipado en convertidores tradicionales (Babu et al., 2018, Gadelrab, 2021). En topologías como la LLC o CLLC, este tipo de conmutación se logra de forma natural dentro del rango resonante lo que permite a los transformadores DCX operar a frecuencias elevadas sin comprometer la eficiencia (Czyz et al., 2022, Gadelrab, 2021). Su implementación no solo mejora el rendimiento energético del sistema, sino que también prolonga la vida útil de los semiconductores y facilita la gestión térmica en aplicaciones donde el espacio y la disipación son factores críticos (Wu et al., 2018, Li, 2022).

Este artículo demuestra que, partiendo del cálculo de un circuito equivalente del tanque resonante, es posible diseñar un transformador DCX de alta eficiencia de manera clara y replicable. El artículo no presenta una topología nueva, sino una forma de diseño verificable que traduce el equivalente del tanque resonante con parámetros y operación concretos con el uso de la conmutación suave.

3. SISTEMA ELECTRÓNICO

En la Fig. 1 se muestra el montaje electrónico del transformador DCX con carga resistiva en SIMetrix. El sistema parte de una fuente en CD que alimenta un inversor clase D; esta elección simplifica el esquema y reduce las pérdidas tanto de conmutación como de conducción. Las compuertas se excitan con una señal cuadrada generada por el simulador. A continuación, se incluye el transformador con tanque resonante LLC (un capacitor y dos inductores, donde uno corresponde a la magnetización del transformador) para favorecer la conmutación suave. En el transformador, el secundario tiene una relación de vueltas específica respecto del primario para elevar la tensión de salida. En el secundario se dispone un puente completo de diodos que rectifica la señal; finalmente, un capacitor de salida la filtra antes de entregarla a la carga, con un bajo porcentaje de rizo.

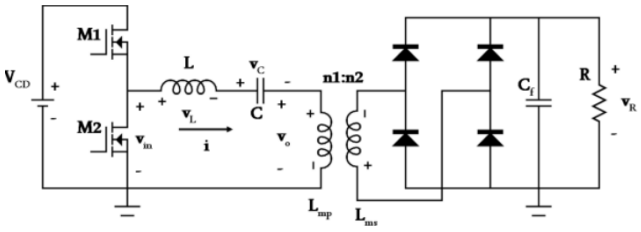


Fig. 1. Circuito del transformador DCX con topología LLC.

Para los parámetros de funcionamiento se tomaron las siguientes especificaciones:

- Frecuencia de 200 kHz.
- Tensión de salida de 220V.
- Tensión de entrada de 73V.
- Tensión de rizo de salida de 1%.
- Potencia de salida de 500W.
- Eficiencia mayor al 90%.

4. ANÁLISIS DEL TANQUE RESONANTE

Se utilizó un método de análisis que se presenta en Uribe et al., el cual es una simplificación del sistema por medio de circuitos equivalentes más simples, siendo en este ejemplo transformar el sistema LLC a un sistema LC serie y se aplica con un análisis de aproximación a la fundamental. Asumiendo un factor de acoplamiento K=1, se realiza el reflejo del secundario al primario con base en la igualdad de potencias, conforme a (1).

$$P = \frac{V1^2}{R} = \frac{V2^2}{R_{eq1}} \qquad (1)$$

Este análisis conduce a la configuración mostrada en la Fig. 2. A partir de ella, se reduce la rama en paralelo mediante análisis de impedancias y se obtienen la resistencia equivalente (R_{eq}) y la resistencia equivalente 1 (R_{eq1}) con (2) y (3), respectivamente.

$$R_{eq} = \frac{8R\eta_r}{\pi^2} \qquad (2)$$

$$R_{eq1} = R\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 = R_{eq}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \qquad (3)$$

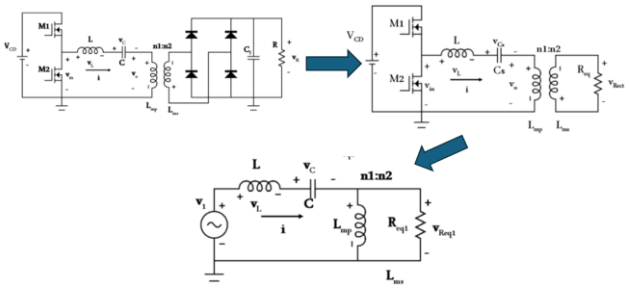


Fig. 2. Proceso del circuito equivalente del tanque resonante con el devanado primario (Uribe et al., 2025).

Para simplificar el circuito, se recomienda utilizar un circuito rectificador sin inductancia que se comporte como una fuente de tensión. El tanque resonante tiene que comportarse como una fuente de corriente, lo cual implica que R_{eq1} debe ser

mucho menor a la reactancia de la inductancia magnetizante del devanado primario del transformador (X_{Lmp}). En resumen: si $R_{eq1} > X_{Lmp}$, el conjunto se comporta como fuente de tensión; si $Req1 < X_{Lmp}$, se comporta como fuente de corriente.

En la Fig. 3 se presenta el circuito equivalente, que se modela como un LC serie. A partir de (4) y (5) se obtienen el inductor serie (L_{se}) y la resistencia serie (R_{se}), respectivamente.

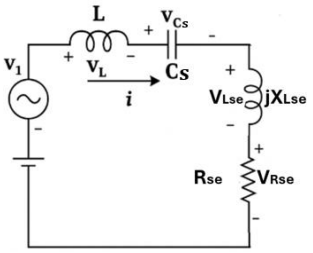


Fig. 3. Circuito equivalente del tanque resonante.

$$X_{Lse} = \frac{jX_{Lmp}R_{eq1}^2}{R_{eq1}^2 + X_{Lmp}^2} \quad (4)$$

$$R_{se} = \frac{jX_{Lmp}^2\, R_{eq1}}{R_{eq1}^2 + X_{Lmp}^2} \quad (5)$$

Para que el sistema se encuentre en condiciones de resonancia se debe presentar la igualdad descrita en (5) las cuales muestran la reactancia de la inductancia en serie (X_L), de la inductancia serie equivalente (X_{Lse}) y del capacitor en serie (X_{Cs}).

$$X_L + X_{Lse} = X_{Cs} \quad (6)$$

Partiendo de (6) para la reactancia de la inductancia magnetizante del devanado primario del transformador (X_{Lmp}) obtenida en el análisis del tanque resonante LLC con transformador en Uribe et al., se tiene (7).

$$X_{Lmp} = \frac{R_{eq1}}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad (7)$$

Si $R_{eq1} \ll X_{Lmp}$ entonces implica que la ganancia (M) $\ll$ 1.4102. Por otro lado, para que X_{Lmp} exista de acuerdo con la misma ecuación M >1, por lo tanto: 1 < M ≤1.4102. Para saber qu´´é tan pequeño debe ser Req1 con respecto a X_{Lmp} el cual se denomina "a" se obtiene (8) y despejando la M se obtiene (9).

$$a = \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad (8)$$

$$M = \frac{\sqrt{a^2 + 1}}{a} \quad (9)$$

Se recomienda que "a" tenga un valor de 10 para una adaptación adecuada del sistema y de esa manera M tiene un valor de 1.0049.

De acuerdo con Uribe et al., al aumentar el factor de calidad (Q) se atenúan de forma notable los armónicos, de modo que el tanque se comporta como un filtro que deja pasar principalmente la componente fundamental. En ese marco, un valor alrededor de Q = 5 se reporta como un buen compromiso para el diseño.

Y por la definición de factor de calidad se tiene (10) y despejando se obtiene (11).

$$Q = \frac{X_L}{R_{se}} = \frac{X_{cs}}{R_{se}} \quad (10)$$

$$X_L = X_{cs} = QR_{se} \quad (11)$$

Para la eficiencia del puente rectificador (η) se usa (12) ya que a tensiones altas tiene la misma eficiencia que un rectificador de 4 diodos RLC.

$$\eta_r = \frac{V_F}{2V_F + V_R} \quad (12)$$

La ganancia total del convertidor CD-CD con tanque resonante LLC con transformador (M_{Rect}) se define con (13).

$$M_{Rect} = \frac{V_R}{V_{CD}} \quad (13)$$

También se tiene la ganancia del tanque resonante LLC sin rectificador (M_t) en (14) y la componente fundamental V_{Rect1} con (15).

$$M_t = \frac{V_{Rect1}}{V_{CD}} = \frac{n_2}{n_1}\frac{2M}{\pi} \quad (14)$$

$$V_{Rect1} = \frac{4V_R}{\pi} \quad (15)$$

Sustituyendo (15) en (14) despejando V_R y sustituyendo en (13) se tiene (16).

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{2M_{Rect}}{M} \quad (16)$$

Por último, se tienen las fórmulas conocidas de la inductancia magnetizante del devanado primario del transformador (L_{mp}), la inductancia serie equivalente (L_{se}), la inductancia serie (L), la inductancia magnetizante del devanado secundario del transformador (L_{ms}), el valor del capacitor en serie (C_s), el capacitor del filtro RC (C_f) y la resistencia del filtro RC (R).

$$L_{mp} = \frac{X_{Lmp}}{\omega} \quad (17)$$

$$L_{se} = \frac{X_{Lse}}{\omega} \quad (18)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (19)$$

$$L_{ms} = L_{mp}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (20)$$

$$C_s = \frac{1}{X_{Cs}\omega} \quad (21)$$

$$C_f = \frac{10.52}{\%V_r\, fR} \quad (22)$$

$$R = \frac{V_R^2}{P} \qquad (23)$$

5. RESULTADOS

En la tabla 1 se pueden observar los parámetros necesarios para calcular los componentes del sistema y así garantizar una alta eficiencia de este.

Tabla 1. Valores establecidos del sistema.

Variable	Valor
Potencia P [W]	500
Tensión de alimentación Vcd [V]	73
Frecuencia f [Hz]	200k
Tensión de salida V_R [V]	220
Factor de calidad Q	5
Relación de impedancias a	10
Tensión directo diodos V_F [V]	0.7
%Vr	1

En la Fig. 4 se puede observar el sistema conectado en el simulador SIMetrix con los componentes previamente calculados y con sus respectivas puntas de pruebas en la entrada y salida del sistema para medir su eficiencia, tensión y corriente del tanque resonante para comprobar que estén en fase.

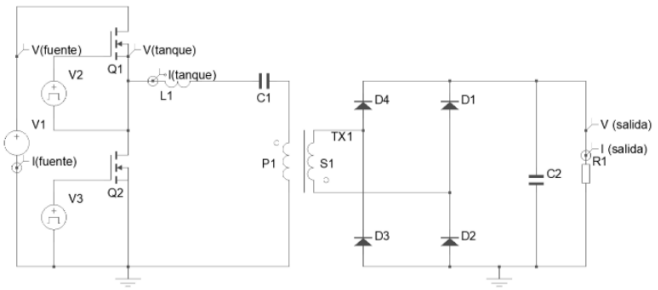
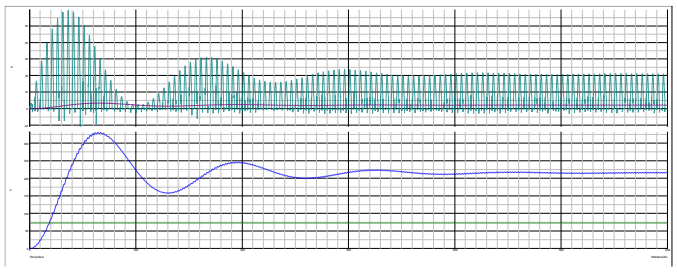


Fig. 4. Circuito del convertidor CD-CD con tanque resonante LLC

En la Fig. 5 se muestra la respuesta del sistema en una simulación de 0.6 ms. El régimen estacionario se alcanza alrededor de t ≈ 270 ns. Se reportan los promedios por ciclo de las puntas de prueba: tensión de salida (línea azul), corriente de salida (línea morada), tensión de entrada (línea verde) y corriente de entrada (línea verde azulado). Los resultados se presentan en dos gráficas: una para corrientes y otra para tensiones siendo el eje Y el valor medido y el eje X el tiempo.



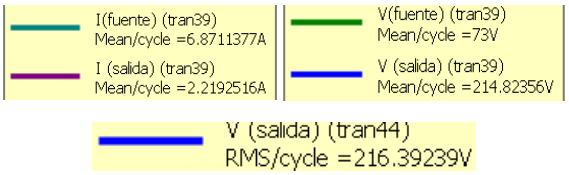


Fig. 5. Valores de tensión y corriente promedio de entrada y salida del sistema y valor RMS de tensión de salida.

Con estos valores, la eficiencia del sistema resulta 95%, coherente con el modelo; la diferencia restante se explica por pérdidas de conmutación y conducción en interruptores y diodos, además de redondeos numéricos en los cálculos.

En la Fig. 6, la tensión del tanque (línea roja) muestra una excitación casi cuadrada y simétrica, mientras que la corriente (línea amarilla) se mantiene prácticamente senoidal gracias al factor de calidad adoptado y se encuentra casi en fase con la tensión, lo que confirma la operación cercana a la resonancia.

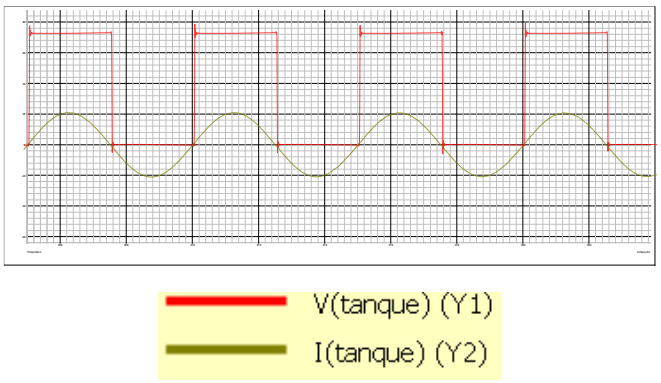


Fig. 6. Tensión y corriente del tanque resonante.

Este detalle es clave: el sistema opera muy cerca de la frecuencia de resonancia, donde la impedancia efectiva del tanque es mayormente resistiva, la transferencia de energía es máxima y se favorece la conmutación suave con pérdidas mínimas. Las pequeñas desviaciones entre tensión y corriente son esperables por parásitos, pero la gráfica confirma que el ajuste del tanque es el adecuado para sostener la operación resonante buscada.

6. CONCLUSIONES

Con los resultados de simulación se verificó la exactitud del procedimiento de diseño del convertidor CD-CD LLC con transformador DCX. La eficiencia del 95% obtenida es consistente con el modelo y se obtiene una operación casi resonante: la tensión y la corriente del tanque se mantienen casi en fase, lo que favorece la conmutación suave y minimiza las pérdidas. Además, el rizo de tensión medido es cercano al 1%, tal como se calculó en el diseño.

Cabe señalar que la eficiencia puede mejorar al emplear dispositivos con menores pérdidas (por ejemplo, MOSFETs de carburo de silicio o nitruro de galio) y simplificar la etapa de rectificación mediante configuraciones con menos dispositivos. Estas alternativas requieren replantear los cálculos del circuito equivalente y ajustar la ventana de operación para conservar la conmutación suave y el rizo objetivo.

REFERENCIAS

Babu, B.C. and Rajesh Babu, R.S. (2018). Analysis of high voltage high power resonant converters. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 9(1), p.174.

Cao, Y., Ngo, K. and Dong, D. (2024c). Resonant commutation electronic-embedded DC transformer (RC-EET DCX) with quasi-trapezoidal current and natural current sharing. IEEE Transactions on Power Electronics, 39(8), pp.9736–9751.

Ceglia, G., Guzmán, V., Walter, J. and Giménez, M. (2011). Experimental tests of a seven level multilevel converter with auxiliary switches circuit. 26(1), pp.107–115. Available at:

Czyz, P., Guillod, T., Krismer, F., Huber, J. and Kolar, J.W. (2022). Design and experimental analysis of 166 kW medium-voltage medium-frequency air-core transformer for 1:1-DCX applications. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 10(4), pp.3541–3560.

Dhanamjayulu, C., Padmanaban, S., Ramachandaramurthy, V.K., Holm-Nielsen, J.B. and Blaabjerg, F. (2021). Design and implementation of multilevel inverters for electric vehicles. IEEE Access, 9, pp.317–338.

Gadelrab, R., Nabih, A., Lee, F.C. and Li, Q. (2021). LLC resonant converter with 99% efficiency for data center server. In: APEC 2021 – IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, pp.310–319.

Li, G. and Wu, X. (2022). A 98.4% efficiency 380 V–12 V DCX with 1.3 kW/in³ power density using low NFoM devices and resonant drive transformer. IEEE Transactions on Power Electronics, 37(10), pp.12346–12356.

Moreta Montaluisa, F.M. and Montaluisa Taco, P.A. (2021). Estudio comparativo de las tres topologías clásicas de los inversores multinivel controlados mediante modulación SPWM y un motor de inducción tipo jaula de ardilla como carga.

Okutani, S., Huang, P.Y., Nishiyama, R. and Kado, Y. (2021). Series resonant converter with embedded filters for DCX of solid-state transformer. In: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2021-October.

Peng, Z., Wang, Y. and Fei, X. (2021). A novel DC transformer (DCX) for single-phase battery energy storage system and current ripple suppression strategy. In: Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition – Asia (ECCE Asia 2021), pp.1045–1050.

Toubal Maamar, A.E., Helaimi, M., Taleb, R., Kermadi, M., Mekhilef, S., Wahyudie, A. and Rawa, M. (2021). Analysis and small signal modeling of five-level series resonant inverter. IEEE Access, 9, pp.109384–109395.

Trabelsi, M., Vahedi, H. and Abu-Rub, H. (2021). Review on single-DC-source multilevel inverters: topologies, challenges, industrial applications, and recommendations. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2, pp.112–127.

Uribe, L.G. (2025). Convertidor resonante bidireccional multipuerto para sistemas fotovoltaicos. Tecnológico Nac. México Cent. Nac. Investig. y Desarro. Tecnológico.

Wu, J., Li, Y., Sun, X. and Liu, F. (2018). A new dual-bridge series resonant DC–DC converter with dual tank. IEEE Transactions on Power Electronics, 33(5), pp.3884–3897.

Implementation of an Observer for Fault Detection in Permanent Magnet Synchronous Motor.

Cantoriano Diego, Edilberto *

* *Instituto Tecnológico de Tijuana, 22430. (e-mail: m24210012@tectijuana.edu.mx).*

Abstract: Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) stand out over conventional motors due to their high efficiency, lower energy losses, reduced operating temperature, and ease of control. However, these motors are still prone to faults that can cause anything from small deviations in performance to significant losses or even major damage that may take them out of operation. Recent studies of fault detection in PMSMs mainly focus on three approaches: signal analysis-based diagnosis, model-based diagnosis, and artificial intelligence-based diagnosis. This work addresses fault detection through model-based methods, aiming to implement a Kalman Filter-based observer designed for sensor fault identification in a PMSM. The motor used in the model is the MBE.300E.500, manufactured by Technosoft. The observer was implemented in Simulink using S-Function Builder blocks, comparing the signals measured by the sensors with the estimated signals from the model. In this way, detecting discrepancies allows identifying the presence of faults. The observer was developed based on the linearization of the motor´s mathematical model and proved to be reliable in identifying signal losses. The results allow future work focused on integrating the observer with fault-tolerant control schemes and extending the methodology to other types of faults in PMSMs.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Kalman Filter, Simulink, Fault Detection, Sensor Faults.

1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos constituyen la fuerza principal que mueve a las maquinas, con el crecimiento del sector industrial automotriz resultaron ser una excelente opción para el aprovechamiento de energía limpia (Iturralde Carrera et al., 2021). Los motores síncronos de imán permanente (PMSM) alcanzan una alta potencia, manteniendo un diseño compacto. Lo que permite ahorrar en espacio, facilita una instalación más discreta y estética. Entre sus características principales destacan su alta potencia, larga vida y durabilidad, menor perdida de energía, temperatura, control y precisión (Krishnan, 2010; Pillay and Krishnan, 1997).

Los PMSM son entre un 20% y un 35% más eficientes que los motores eléctricos convencionales (Gieras, 2011; Hanselman, 2003). Para los PMSM, una falla es cualquier desviación del comportamiento esperado que comprometa su rendimiento ó eficiencia, poniendo en riesgo capacidad para realizar su función requerida.

Las fallas en PMSM pueden ser clasificadas en diversas categorías: un 41% de ellas ocurren en componentes mecánicos, el 37% se deben a problemas en el estator, el 10% en el rotor y el 12% en otras partes del motor (Cheng, Hang and Zhang, 2015).

Los estudios más recientes sobre la detección de fallas para motores PMSM abarcan tres enfoques principales: el diagnóstico mediantes análisis de señales, el diagnóstico basado en modelos matemáticos, y el diagnóstico a través de métodos de inteligencia artificial (IA) (Orlowska-Kowalska et al., 2022).

En este trabajo se presenta la implementación de un observador basado en un filtro de Kalman para la detección de fallas en sensores de corriente de un PMSM. A diferencia de otros estudios, la propuesta se centra en una implementación directa en Simulink utilizando bloques S-Function Builder, lo que facilita la integración con modelos no lineales del motor y permite evaluar la efectividad del observador ante fallas de pérdida de señal en los sensores.

2. METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en Simulink de Matlab, utilizando el modelo dinámico del motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) en coordenadas dq. Este modelo permite presentar de forma compacta las relaciones entre las variables eléctricas y mecánicas del motor.

Antes de presentar las ecuaciones, definimos los símbolos utilizados:

2.1 Modelo matemático del PMSM

El modelo matemático del PMSM puede representarse en tres formas diferentes: abc, $\alpha\beta$ y dq. Cada representación proporciona una perspectiva diferente del comportamiento del motor, y decidir el modelo a utilizar depende exclusi-

Tabla 1. Símbolos utilizados en las ecuaciones del modelo del PMSM y del observador

Símbolo	Descripción
i_d, i_q	Corrientes del estator en ejes d y q
v_d, v_q	Voltajes aplicados en ejes d y q
ω_r	Velocidad mecánica del rotor
R, L	Resistencia e inductancia del estator
ψ	Flujo magnético del rotor
K_m	Constante de torque
J, F	Inercia del rotor y coeficiente de fricción viscosa
p	Número de pares de polos
T_L	Torque de carga
T_s	Período de muestreo
Q, R	Covarianzas de proceso y medición
P	Matriz de covarianza del estado
K_k	Ganancia de Kalman

vamente del objetivo que se planea alcanzar. La transformada de Clarke convierte las componentes del dominio del tiempo de un sistema trifásico abc a dos componentes de un marco estacionario ortogonal $\alpha\beta$. La transformada de Park convierte las dos componentes del marco $\alpha\beta$ a un marco de referencia giratorio ortogonal dq. En esta investigación se emplea el modelo dq debido a que simplifica el análisis de armónicos y desbalances, lo cual facilita identificar anomalías de manera más eficiente.

En la Figura 1, se aprecia como a partir del modelo estacionario $\alpha\beta$, la transformación de Park permite obtener el sistema dq, que rota con el rotor, alineando el eje d con el flujo del rotor. El ángulo eléctrico θ_e define la orientación del sistema dq respecto al sistema $\alpha\beta$.

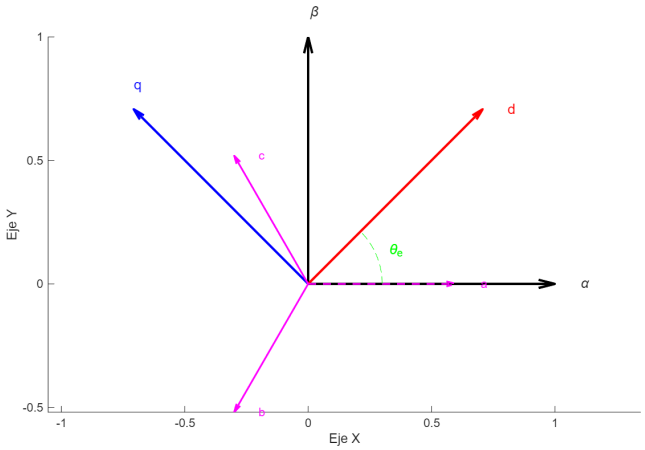


Fig. 1. Relación geométrica entre los sistemas de referencia en el modelo del PMSM.

El modelo matemático resultante para el PMSM en el sentido dq se representa mediante las siguientes tres ecuaciones:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + p\omega_r i_q + \frac{v_d}{L}, \tag{1}$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - p\omega_r i_d - \frac{\psi}{L}p\omega_r + \frac{v_q}{L}, \tag{2}$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{K_m}{J}i_q - \frac{F}{J}\omega_r - \frac{T_l}{J}. \tag{3}$$

2.2 Observador basado en filtro de Kalman

EL observador se diseñó utilizando un filtro de Kalman, con el objetivo de estimar las corrientes i_d, i_q y la velocidad w_r a partir de los voltajes aplicados y las mediciones disponibles. El filtro Kalman tiene la forma:

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \tag{4}$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \tag{5}$$

x son los valores que serán estimados por el filtro, y son las salidas, u es la información necesaria para definir la dinámica del sistema, w y v ruido de proceso y ruido de medición del sistema, F contiene los coeficientes de los términos de estado en la dinámica de estados, G contiene los coeficientes de los términos de entrada en la dinámica de estados.

La predicción discreta de los estados es:

$$x^-_{k+1} = x_k + T_s\, f(x_k, u_k) \tag{6}$$

donde:

$$f(x_k, u_k) = \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix}.$$

El Jacobiano linealizado se define como:

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R}{L} & T_s\omega_e & T_s i_q \\ -T_s\omega_e & 1 - \frac{T_s R}{L} & -T_s\frac{\phi_0}{L} \\ 0 & T_s\frac{1.5p\phi_0}{J} & 1 - \frac{T_s F}{J} \end{bmatrix} \tag{7}$$

La predicción de la covarianza es:

$$P^-_{k+1} = A_k P_k A_k^T + Q \tag{8}$$

La ganancia de Kalman diagonal simplificada se calcula:

$$K_k = P^-_{k+1}(P^-_{k+1} + R)^{-1} \tag{9}$$

La corrección de los estados mediante la medición es:

$$x_{k+1} = x^-_{k+1} + K_k(y_k - x^-_{k+1}) \tag{10}$$

Finalmente, la covarianza se actualiza como:

$$P_{k+1} = (I - K_k)P^-_{k+1} \tag{11}$$

Como se observa en las ecuaciones 1 y 2, las ecuaciones del eje d y q muestran la dinámica del PMSM bajo la influencia de la tensión de entrada y la inductancia mutua.

3. RESULTADOS

Se utilizó el entorno de simulación de alta presición de Simulink de MATLAB para modelar y analizar el compor-

tamiento de un motor PMSM. El modelo implementado incluye la representación dinámica del motor en coordenadas dq, obtenidas mediante las transformaciones de Clarke y Park. Sobre este modelo se desarrolló un observador basado en un filtro de Kalman, cuyo objetivo es estimar las corrientes del estator. La validación se realizó aplicando voltajes de referencia al modelo del motor y comparando las corrientes reales (i_d, i_q) con las corrientes estimadas obtenidas por el observador.

Se realizaron simulaciones para distintas condiciones de operación del motor y se generaron gráficos que muestran las corrientes reales, las estimadas y el error entre ellas.

El PMSM utilizado para las pruebas es el motor MBE.300E.500, fabricado por Technosoft. Sus caracteristicas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del PMSM utilizado.

Símbolo	Valor	Unidad de medición
R	4.3	Ω
L	3.56 x 10^4	H
K	36.8 x 10^3	Nm/A
ψ	24.5 x 10^3	Nm/A
P	1	
F	3 x 10^6	Nms
J	1.1 x 10^6	kgm^2

Los resultados obtenidos muestran valores estimados muy cercanos a los medidos. En las siguientes dos gráficas podemos visualizar el error que existe en la estimación. En la Figura 2 y Figura 3 se realiza la comparación entre la señal medida y la señal estimada por el observador.

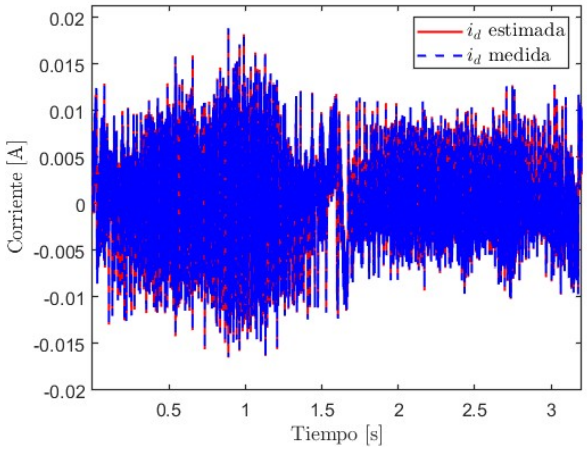


Fig. 2. Señal medida y señal estimada i_d.

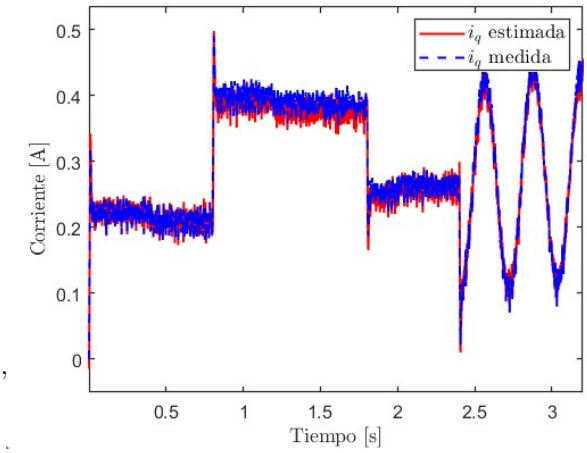


Fig. 3. Señal medida y señal estimada i_q.

La Figura 4 muestra la respuesta del observador ante la perdida de señal del sensor i_q, en la gráfica se observa que despues del arranque ocurre una perdida de señal y el observador logra continuar estimando los valores de i_q *estimada* sin contrar con la retroalimentacion del sensor i_q.

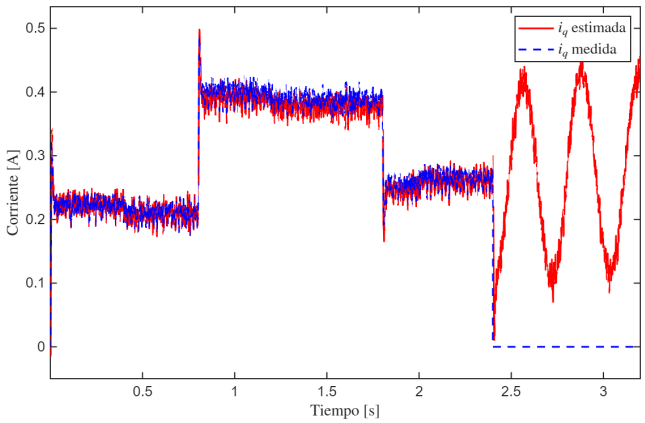


Fig. 4. Perdida de señal del sensor.

El error de estimación se mantuvo dentro de márgenes aceptables, demostrando la efectividad del observador para detectar fallas en sensores.

La principal limitación que enfrenta esta investigación es la disponibilidad de recursos económicos. Algunas fallas que sería necesario inducir para validar el desempeño del observador pueden provocar daños irreversibles en el motor, convirtiéndolo en pérdida total. Esto implica que sería necesario reemplazar el equipo tras cada prueba destructiva, lo cual eleva significativamente los costos experimentales y dificulta la realización de un estudio más amplio.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el observador propuesto logra mantener una estimación confiable de las corrientes incluso ante fallas en los sensores, validando su

efectividad para diagnóstico en sistemas PMSM. Este desempeño confirma el potencial del método para integrarse en esquemas de control tolerante a fallas, contribuyendo a mejorar la fiabilidad y continuidad operativa.

El principal aporte de este trabajo radica en la implementación práctica y validación de un observador Kalman simplificado dentro del entorno de Simulink, utilizando un modelo dinámico del PMSM en coordenadas *dq*. Los resultados de simulación mostraron que el error de estimación se mantiene dentro de márgenes aceptables, incluso durante la pérdida de señal del sensor, lo que demuestra la robustez del esquema propuesto.

Como trabajo futuro, se propone la validación experimental del observador en una plataforma de hardware en tiempo real, así como la extensión del método hacia la detección de fallas eléctricas y mecánicas en el PMSM, y su integración con estrategias de control en lazo cerrado para mejorar la resiliencia del sistema.

REFERENCIAS

[1] Cheng, M., Hang, J. and Zhang, J. (2015) 'Curva de torque-velocidad del motor PMSM', en *Overview of Fault Diagnosis Theory and Method for Permanent Magnet Machine*, Vol. 1, No. 1, p. 15. Chinese Journal of Electrical Engineering.

[2] Iturralde Carrera, L. A., Monteagudo Yanes, J. P. and Castro Perdomo, N. A. (2021) 'Energy efficiency and business competitiveness in north America', *Revista Universidad y Sociedad*, 13(5), pp. 479-489.

[3] Krishnan, R. (2010) *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press, p. 45.

[4] Gieras, J. F. (2011) *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*. 3rd edn. CRC Press, pp. 12-15.

[5] Orlowska-Kowalska, T., Wolkiewicz, M., Pietrzak, P., Skowron, M., Ewert, P., Tarchala, G., Krzysztofiak, M. and Kowalski, C. T. (2022) 'Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives: State of the art and future challenges', *IEEE Access*, 10, pp. 3180153.

Optimization of a solar heater with integrated reflective mirrors

Reyes Alonso, Gonzalo [*], **Estrada Cruz, Edgar** [*], **Barrera González, Ismael** [*]

[*] *Tecnológico Nacional de México/ITS del Occidente del Estado de Hidalgo, Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, CP. 42700, (e-mail: greyes, eestradac, ibarrera@itsoeh.edu.mx).*

Abstract: In line with Mexico's international commitments to reduce greenhouse gas emissions, the adoption of sustainable technologies that lessen reliance on fossil fuels such as LP gas is crucial. Solar water heaters represent a viable alternative by harnessing solar radiation to reduce energy consumption in domestic and rural sectors. This study focuses on optimizing a 200-liter commercial solar heater by incorporating reflective mirrors to enhance thermal efficiency. Three configurations were evaluated: no mirrors, flat mirrors, and angled mirrors. Experiments were conducted in Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, Mexico, measuring water temperature, solar radiation, ambient temperature, and wind speed. Results indicate that the base configuration achieved a maximum temperature of $43°C$, flat mirrors increased it moderately to $45°C$, while angled mirrors reached $48°C$, yielding a $+5°C$ improvement over the base case. These results demonstrate that angled reflectors offer a practical, accessible, and low-cost strategy to improve solar energy utilization in commercial thermal systems.

Keywords: Solar water heater, Reflective mirrors, Thermal efficiency, Renewable energy

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más consciente del uso eficiente de la energía y el aprovechamiento de fuentes renovables, la mejora de las tecnologías existentes se vuelve una tarea esencial debido a su impacto ambiental y social. Derivado de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de París 2015, México se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 22 % para 2030 (Pauw, 2023).

El cumplimiento de este objetivo enfrenta problemas significativos, uno de los principales, es la fuerte dependencia de combustibles, en especial del gas LP. Este combustible genera gases de efecto invernadero, liberando compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y partículas en suspensión (PM) (Francoeur et al., 2021), los cuales representan riesgos tanto para la salud humana como para los ecosistemas (EPA, 2020). A estos riesgos se suma la propiedad altamente inflamable del gas LP y en caso de fugas puede provocar daños a la calidad del aire y del suelo. De acuerdo con Michanowicz et al. (2021) las estrategias destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero tienen el potencial de lograr reducciones conjuntas en fuentes comunes de otros contaminantes.

A pesar de sus efectos negativos, el gas LP ocupa un lugar primordial en la vida cotidiana y en el desarrollo social y económico de México. Alrededor del 75 % de los hogares mexicanos lo utilizan como principal fuente de energía, ya que constituye una opción más limpia y eficiente que otros combustibles tradicionales empleados en el sector doméstico, como la leña o el carbón de acuerdo a lo reportado por la Secretaría de Energía (2017) en su Prospectiva de Gas LP 2017-2031. Sin embargo, su uso generalizado no elimina la necesidad de explorar alternativas sostenibles que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles.

En este sentido, la leña continúa siendo una fuente energética de gran relevancia en México, especialmente en comunidades rurales. Aunque su consumo resulta difícil de cuantificar debido a las diferencias culturales, regionales y socioeconómicas, la Secretaría de Energía estima que su uso sigue siendo común (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2018). El Balance Nacional de Energía (BNE) (Gobierno de México, 2023) reportó que, en 2019, la leña representó el 26 % del consumo final de energía en el sector residencial; Manzano et al. (2021) calculan que alrededor de 4.5 millones de hogares y 18 millones de personas que dependían de ella . No obstante, persiste la carencia de información precisa que permita comprender a fondo los patrones de consumo de este recurso, lo cual representa un desafío para diseñar políticas públicas más efectivas.

Considerando este panorama, resulta indispensable promover la mejora de las tecnologías actuales y potenciar el aprovechamiento de fuentes renovables, en particular la energía solar. México, gracias a su ubicación geográfica, cuenta con uno de los niveles de radiación solar más altos del mundo, con promedios diarios que oscilan entre 5.66 y 6.15 kWh/m^2 en gran parte de su territorio (Valdes-Barrón et al., 2014). Este recurso natural inagotable ofrece una oportunidad única para impulsar tecnologías sostenibles como los calentadores solares de agua, que representan una alternativa eficiente, económica y ecológica

frente al uso de gas LP y otros combustibles fósiles (Nanda et al., 2023).

De acuerdo con Nanda et al. (2023), la implementación de calentadores solares contribuye significativamente a reducir el consumo de combustibles fósiles y, en consecuencia, las emisiones de gases de efecto invernadero, además de disminuir los costos energéticos a nivel doméstico, ya que tras la inversión inicial los gastos operativos son prácticamente nulos. Estas tecnologías resultan especialmente valiosas en contextos de pobreza energética, donde permiten a millones de personas acceder a mejores condiciones de higiene, salud y bienestar. Asimismo, su impacto se extiende a sectores estratégicos como el turismo, la educación y la salud pública, al garantizar la disponibilidad de agua caliente en entornos con alta demanda y recursos limitados.

En este contexto, el presente proyecto se centra en la optimización de un calentador solar tradicional mediante la integración de un componente clave: espejos reflectores. El objetivo es innovar en el aprovechamiento de la radiación solar en calentadores de agua de tubos mediante la incorporación de espejos planos e inclinados. Esta adaptación busca no solo mejorar el rendimiento del calentador, sino también ofrecer una alternativa sostenible, económica y accesible para el calentamiento de agua en entornos domésticos y rurales.

El artículo está organizado como sigue: en la sección 2 encontrara el desarrollo de prototipo, describiendo materiales, equipos y configuraciones del calentador solar de agua; además, se explica la metodología aplicada y el lugar de los ensayos, las condiciones ambientales y las variables medidas; para la sección 3 se presentan los datos obtenidos y se analizan las diferencias entre las configuraciones. Finalmente, en la sección 4se destacan los principales hallazgos.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del sistema se seleccionaron equipos y materiales de uso común y de fácil acceso; se consideraron sus propiedades térmicas y ópticas. A continuación se describen los componentes que integran el sistema y, posteriormente, se muestran las configuraciones analizadas en este trabajo.

2.1 Equipos y materiales

El elemento principal de este estudio es el calentador solar de agua, se eligió uno del tipo comercial con las siguientes características: es un sistema de baja presión con estructura tubular metálica de acero inoxidable, caracterizado por su bajo costo y una capacidad de 200 litros (véase la Fig. 1).

Como se observa en la Fig. 2, la disposición de los tubos del calentador solar ocupa un área total de 1.91149 m^2. Sin embargo, la radiación solar incide de manera directa únicamente sobre la superficie de los tubos, cuya área efectiva corresponde a 1.44669 m^2. Esto implica que el 24.316 % del espacio disponible del arreglo de tubos no recibe radiación útil, generando zonas que reciben radiación solar no utilizada, esto limita el aprovechamiento

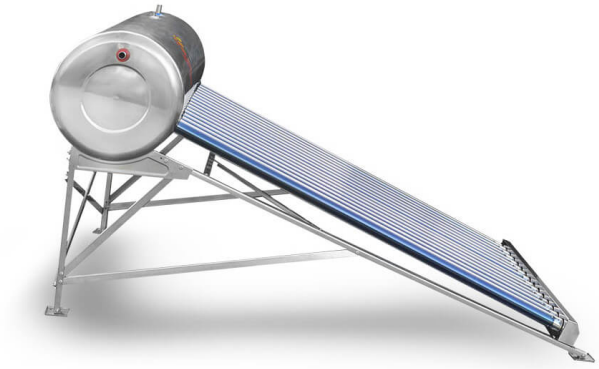


Fig. 1. Calentador solar de agua comercial.

Fig. 2. Área total de los tubos.

energético del sistema. Con el objetivo de reducir esta pérdida y redirigir la radiación hacia las superficies activas del colector (tubos), se consideró la implementación de un montaje experimental con un par de espejos planos, cada uno con dimensiones de 1.08 $m \times 0.335$ m, lo que proporciona un área reflectora total de 0.7236 m^2. Estos espejos permiten ampliar la captación efectiva de radiación, concentrándola sobre los tubos y, en consecuencia, mejorar el desempeño térmico del calentador solar, cubriendo un área de 0.1736 m^2, esto significa un porcentaje extra 9.085% del área total.

La investigación se enfocó en revisar tres configuraciones del calentador solar de agua, descritas a continuación:

(1) El calentador solar operó únicamente con sus tubos receptores, sin el uso de espejos auxiliares, con el objetivo de establecer una línea base de su rendimiento térmico sin intervención externa.
(2) Se colocó una placa de espejo en posición paralela a los tubos del calentador solar, ubicada por debajo de estos. El propósito de esta disposición fue redirigir y concentrar la radiación incidente hacia la superficie

Fig. 3. Calentador solar de agua con espejos.

de los tubos, con el fin de incrementar la absorción de energía térmica y, en consecuencia, mejorar la eficiencia del calentamiento del agua. En este caso, con el uso de espejos comerciales, se abarca un porcentaje de área extra del 9.085 m^2.

(3) En la tercera, se incorporaron espejos planos colocados por debajo de los tubos con una inclinación de $\alpha^\circ = 8.49^\circ$ respecto al plano inclinado de la estructura del colector. Esta disposición permitió reflejar la radiación incidente hacia la parte inferior de los tubos, incrementando el área efectiva de captación y favoreciendo un mayor aprovechamiento de la energía solar.

Para este estudio se adoptó un ángulo de inclinación arbitrario, sin considerar aún un proceso de optimización.

Adicionalmente, durante las pruebas se emplearon instrumentos de medición como lo son: un termómetro, un medidor de radiación solar y un anemómetro. En la Fig. 3 se puede observar el sistema instalado.

2.2 Pruebas experimentales

Los experimentos se llevaron a cabo en Mixquihuala de Juárez, estado de Hidalgo, México, en la ubicación geográfica 20.204169° de latitud y −99.222285° de longitud, a una altitud de 2000.2 m.s.n.m. El colector solar fue instalado con orientación hacia el sur y una inclinación de los tubos de 20°. Las mediciones se realizaron durante el periodo comprendido entre los meses de abril y junio de 2025, en un horario de 10:00 a 14:00 horas (GMT-6), con intervalos de muestreo de una hora.

Además, previo a tomar las mediciones, se procedió al drenado del calentador solar con el fin de restablecer la temperatura inicial del agua a condiciones ambientales antes de iniciar cada prueba.

Las variables registradas incluyeron factores ambientales relevantes, tales como la temperatura ambiente, la temperatura del agua, la incidencia de radiación solar y las condiciones meteorológicas, considerando específicamente la velocidad del viento en cada intervalo de muestreo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el primer caso, donde el calentador de agua solar se encuentra sin espejos, se tienen los resultados mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados experimentales del calentador solar sin espejo

Hora	Temp. agua ($^\circ C$)	Radiación (W/m^2)	Vel. viento (m/s)	Temp. amb. ($^\circ C$)
		30 de abril		
10:00	27	275	1.7	20
11:00	33	682	1.8	22
12:00	37	857	2	24
13:00	42	1021	1	26
14:00	43	990	1.1	27
		2 de mayo		
10:00	26	635	1.1	21
11:00	31	760	1.5	23
12:00	37	930	1.5	25
13:00	42	1030	1.3	27
14:00	43	990	1.3	28

De acuerdo a los datos recabados, se obtiene un incremento promedio diario de $+16.5^\circ C$ (de $26.5^\circ C$ a $43.0^\circ C$), para una radiación promedio de 817 W/m^2. Para este caso se tiene una temperatura máxima alcanzada fue $43^\circ C$. Estos datos se toman como referencia para valorar el comportamiento de la inclusión de los espejos.

Para el segundo caso de estudio se considera la colocación de placa de espejo paralela al plano de los tubos del calentador, obtenido los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados experimentales con espejos planos respecto a los tubos

Hora	Temp. agua ($^\circ C$)	Radiación (W/m^2)	Vel. viento (m/s)	Temp. amb. ($^\circ C$)
		29 de mayo		
10:00	22	653	1.4	24
11:00	28	1046	1	26
12:00	32	884	2	28
13:00	37	653	1.6	30
14:00	42	724	1.8	31
		30 de mayo		
10:00	23	500	1.6	24
11:00	29	961	1.2	26
12:00	36	829	1.3	28
13:00	40	880	1.2	30
14:00	45	795	1.1	31

El segundo caso analizado, consiste en colocar los espejos planos, con los siguientes resultados: hay un incremento promedio diario de $+21^\circ C$ (de $22.5^\circ C$ a $43.5^\circ C$), para una radiación promedio de 792.5 W/m^2, en esta situación se tiene una temperatura máxima alcanzada de $45^\circ C$. Aunque la radiación incidente es menor que en el caso sin espejos, la geometría de la colocación de los espejos permite dirigir la radiación solar hacia los tubos de calentador, esto permite elevar la temperatura, logrando $+5^\circ C$ respecto al caso base. Sin embargo se debe de considerar

que se inicia de una temperatura baja, respecto a los datos de referencia.

Mejoran frente al caso sin espejos, pero la temperatura final queda solo $0.5°C$ por encima del caso base.

El caso de estudio tres, se considera la colocación de placas de espejos con un angulo de inclinación, generando los resultados que se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados experimentales con espejos en ángulo respecto a los tubos

Hora	Temp. agua $(°C)$	Radiación (W/m^2)	Vel. viento (m/s)	Temp. amb. $(°C)$
21 de mayo				
10:00	28	549	1.7	23
11:00	33	668	1.1	25
12:00	37	823	2	27
13:00	43	932	5.2	29
14:00	48	941	3.3	30
22 de mayo				
10:00	26	548	1.1	23
11:00	30	634	1.9	25
12:00	35	800	1.3	27
13:00	41	865	0.8	29
14:00	46	862	1.5	30

En la ultima consideración, el espejo colocado en ángulo, se obtienen los siguientes resultados: hay un incremento promedio diario de $+20°C$ (de $27°C$ a $47°C$), para una radiación promedio de 762.2 W/m^2, en esta situación se tiene una temperatura máxima alcanzada de $48°C$.

Para este caso, es inferior respecto a los dos casos previos, el efecto de dirigir la radiación solar hacia los tubos resulta más eficiente que el caso con espejos planos.

La tabla 4 presenta un resumen de cada uno de los casos.

Tabla 4. Comparación global de las configuraciones analizadas

Configuración	$T_{o,prom}$ $(°C)$	$T_{f,prom}$ $(°C)$	Δ $(°C)$	T_{max} $(°C)$
Sin espejos	26.5	43	+16.5	43
Espejos planos	22.5	43.5	+21	45
Espejos en ángulo	27	47	+20	48

En la figura 4 se muestra la comparación de los promedio por configuración, donde la línea azul corresponde al caso sin espejos, la línea negra a los espejos en ángulo y la línea roja a los espejos planos.

En suma de lo anterior y con el objetivo de evaluar la relación entre la radiación solar incidente y la temperatura del agua en las tres configuraciones del calentador solar (sin espejos, con espejos planos y con espejos en ángulo), se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r) (Berman (2016)). Este parámetro permite cuantificar la intensidad y dirección de la asociación lineal entre dos variables continuas.

El coeficiente de correlación de Pearson se calculó mediante la expresión 1

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

donde x_i representa los valores de radiación solar y y_i los valores de temperatura del agua. Además, se determinó

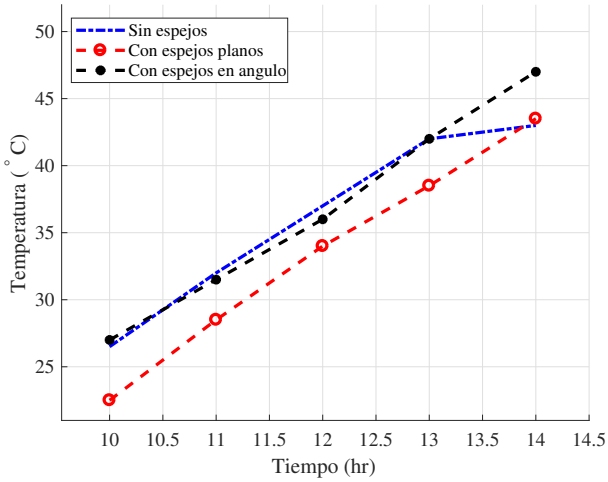


Fig. 4. Comparación de la temperatura promedio de las tres configuraciones.

el valor de significancia (p) para establecer la validez estadística de la correlación.

En la Tabla 5 se muestran los coeficientes de correlación obtenidos para cada configuración del sistema.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre la radiación solar y la temperatura del agua.

Configuración	Coef. Pearson (r)	Valor-p
Sin espejos	0.8877	0.0006
Espejos planos	0.1731	0.6325
Espejos en ángulo	0.9468	0.00002

Los resultados en la figura 5 muestran una correlación positiva fuerte entre la radiación solar y la temperatura del agua para el caso sin espejos ($r = 0.8877$, $p < 0.01$), lo que indica una relación lineal significativa.

En la configuración con espejos planos, el valor obtenido ($r = 0.1731$, $p > 0.05$) sugiere una correlación débil y no significativa, lo que implica que la variación de la temperatura del agua no depende directamente de la radiación solar registrada, posiblemente debido a la geometría o a condiciones iniciales distintas.

Por otro lado, en el caso de espejos en ángulo, se observó una correlación muy fuerte y significativa ($r = 0.9468$, $p < 0.001$), indicando que el incremento de radiación solar se traduce directamente en un aumento de la temperatura del agua. Esto confirma la efectividad del diseño con espejos inclinados para mejorar el aprovechamiento térmico del sistema.

4. CONCLUSIONES

El análisis experimental mostró que la inclusión de espejos mejora el desempeño térmico del calentador solar de agua. La configuración base, sin espejos, alcanzó una temperatura máxima de $43°C$, mientras que los espejos planos indican una mejora moderada. La disposición con espejos en ángulo resultó la más eficiente, logrando hasta $48°C$ y un incremento de $+5°C$ respecto al caso base.

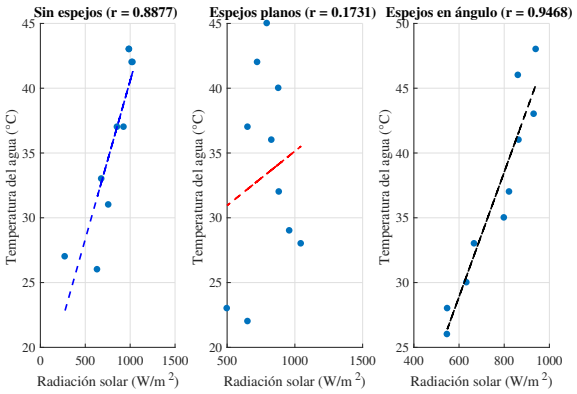


Fig. 5. Correlación entre radiación solar y temperatura del agua

Por otra parte, el análisis estadístico evidencia que la correlación más alta se presenta en la configuración con espejos en ángulo, donde la relación lineal entre radiación y temperatura es prácticamente directa. Esta condición confirma que el ajuste angular de los reflectores optimiza la captación energética del calentador solar, mejorando su desempeño térmico de forma significativa.

REFERENCIAS

Berman, J.J. (2016). *Data simplification: taming information with open source tools*. Morgan Kaufmann.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2018). Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de méxico, 2018. Technical report, CEPAL. URL `https://www.cepal.org/es/publicaciones/43612-informe-nacional-monitoreo-la-eficiencia-energetica-mexico-2018`. Accedido: 18 de septiembre de 2025.

EPA, U. (2020). Integrated science assessment for oxides of nitrogen, oxides of sulfur, and particulate matter-ecological criteria. *US Environmental Protection Agency, Washington, DC*.

Francoeur, C.B., McDonald, B.C., Gilman, J.B., Zarzana, K.J., Dix, B., Brown, S.S., de Gouw, J.A., Frost, G.J., Li, M., McKeen, S.A., et al. (2021). Quantifying methane and ozone precursor emissions from oil and gas production regions across the contiguous us. *Environmental Science & Technology*, 55(13), 9129–9139.

Gobierno de México (2023). Balance nacional de energía 2023. URL `https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance\_Nacional\_de\_Energ\_a\_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf`. Accedido: 18 de septiembre de 2025.

Manzano, F.A., Abeldaño Zuñiga, R.A., and de Lima, G.N. (2021). Use of biomass fuels for cooking and improved biomass stoves in mexico. In *Sustainable Policies and Practices in Energy, Environment and Health Research: Addressing Cross-cutting Issues*, 625–639. Springer.

Michanowicz, D., Lebel, E., Domen, J., Hill, L., Jaeger, J., Schiff, J., Krieger, E., Banan, Z., Goldman, J., Nordgaard, C., et al. (2021). Methane and health-damaging air pollutants from the oil and gas sector: Bridging 10 years of scientific understanding. *Physicians, Scientists, and Engineers Health Energy*.

Nanda, I.R., Pambudi, N.A., and Aziz, M. (2023). Review on the progress of solar water heaters and their future perspectives. *Energy Technology*, 11(10), 2300191.

Pauw, P. (2023). Nationally determined contributions. In *Essential Concepts of Sustainable Finance: An AZ Guide*, 154–155. Routledge Taylor & Francis Group.

Secretaría de Energía (2017). Prospectiva de gas lp 2017-2031. URL `https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/286235\Prospectiva\_de\_Gas\_LP\_2017.pdf`. Accedido: 18 de septiembre de 2025.

Valdes-Barrón, M., Riveros-Rosas, D., Arancibia-Bulnes, C., and Bonifaz, R. (2014). The solar resource assessment in mexico: State of the art. *Energy Procedia*, 57, 1299–1308. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.120. 2013 ISES Solar World Congress.

Peltier cell for generating energy using passive sources of cold and heat

Aparicio Rodríguez Oswaldo, González Ortega Alfredo , Aguayo Alquicira Jesús

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)
E-mail; m24ce019@cenidet.tecnm.mx, alfredo.go@cenidet.tecnm.mx, jesus.aa@cenidet.tecnm.mx.

Abstract: Thermoelectric generation based on Peltier cells is an alternative to convert temperature gradients into electrical energy, its study is relevant for renewable energy applications and power electronics. In this work, experimental tests were carried out to analyze the voltage and current produced by an array of Peltier modules under controlled thermal conditions, supported by a simulation to validate the observed behavior. The obtained results show the influence of the Seebeck effect on the electrical response, highlighting the relationship between temperature difference, generated voltage and conversion efficiency in the modules.

Keywords: Renewable energy, Thermoelectric generation, Peltier cells, Seebeck effect, Temperature gradient.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se ha notado un considerable deterioro climático debido principalmente al uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en algunas actividades del ser humano [Ramírez, J.A.V. 2018].

La energía eléctrica es un componente crítico de la infraestructura de una nación y desempeña un papel vital en su crecimiento y desarrollo económico. Impulsa el sector manufacturero, apoya las redes de transporte y comunicación y permite la prestación de servicios esenciales, como la atención médica y la educación.

La energía eléctrica se produce típicamente utilizando varias fuentes, incluyendo carbón, petróleo, gas natural, entre otros. Desafortunadamente, estas fuentes están disminuyendo gradualmente y contribuyen a la contaminación al descargar materiales peligrosos y gases nocivos a la atmósfera y al agua. Además, los altos costos operativos, los gastos de combustible y otros factores obstaculizan la generación asequible de energía eléctrica a partir de estas fuentes [Faheem, M. 2024],[Aridi, R. 2021].

La solución al problema es aumentar la eficiencia energética de las instalaciones y procesos, así como la integración de fuentes renovables. Las cuales son respetuosas con el medio ambiente y han demostrado ser candidatas eficientes, limpias y de bajo costo [Skala, A. 2018],[Gomaa, M.R. 2020] ya que son inagotables por naturaleza, ambientalmente seguras, escalables y pueden implementarse en diversas aplicaciones como áreas industriales, comerciales, agrícolas, residenciales y pueden producir energía en regiones remotas e inadecuadas [Makola, C.S. 2023],[Iyer, R. 2023].

Su principal objetivo es crear dispositivos generadores de energía lo suficientemente eficientes y rentables como para sustituir los combustibles fósiles [Win, S.L.Y. 2024].

Gracias a que se quiere lograr ese objetivo existe un creciente interés en la recolección de energía mediante métodos no convencionales. Este tipo de métodos contribuyen al desarrollo de un entorno más limpio y sostenible para las futuras generaciones.

Para la recolección de energía la aplicación de energía solar es muy importante ya que tiene un uso muy amplio. Uno de los usos de la energía solar es concentrando el calor en un sistema de generación termoeléctrico que realice una diferencia de temperatura (gradiente térmico) y generando así una energía eléctrica [Singh, B. 2014],[Ridwan, M. 2025].

Para realizar esta diferencia de temperatura se utiliza una celda Peltier, que se basa en postulados físicos tales como el efecto Seebeck y el efecto Peltier [Seyednezhad, M. 2021],[Ramírez, C.R. 2017].

El presente trabajo busca aportar al aprovechamiento de la energía solar mediante el estudio y caracterización de celdas Peltier a partir del efecto Seebeck. A través de la integración de un concentrador solar y el análisis de diferentes arreglos de conexión, se demuestra la posibilidad de obtener un mayor aprovechamiento de las celdas Peltier como fuente de energía eléctrica. De esta manera, el proyecto ofrece una alternativa práctica y de bajo costo para explorar el potencial de los dispositivos termoeléctricos en aplicaciones de pequeña escala y contribuir al desarrollo de tecnologías renovables accesibles.

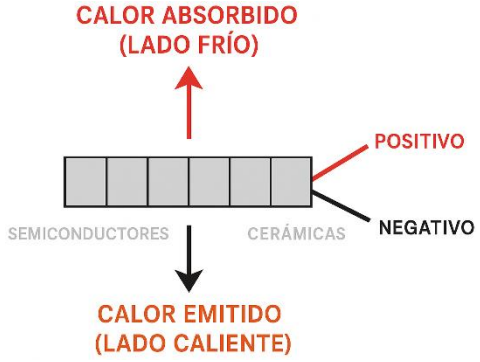


Fig. 1. Estructura de una celda Peltier.

2. PRINCIPIOS TERMOELÉCTRICOS EN CELDAS PELTIER

Una celda Peltier es un dispositivo dispuesto por pares termoeléctricos (materiales semiconductores de tipo N y P). Estos dispositivos están conformados por muchas junturas elementales, donde una sola produce bajos niveles de potencia, de tal manera que, para obtener potencias de utilidad práctica, es necesario conectar un número de estas junturas eléctricamente en serie para aumentar el voltaje de salida y térmicamente en paralelo para disminuir su resistencia térmica [Shilpa, M. 2023].

El mejor material termoeléctrico debe tener las propiedades térmicas de los sólidos vítreos o amorfos, y las propiedades eléctricas de los materiales cristalinos [Nimmagadda, L.A. 2021]. Esto quiere decir que los mejores materiales semiconductores termoeléctricos implican un equilibrio entre tres factores, combinando una alta termopotencia y alta conductividad eléctrica, pero con una baja conductividad térmica [Snyman, L.W. 2021].

Los materiales semiconductores termoeléctricos que se utilizan generalmente en las celdas Peltier son aleaciones de telurio de bismuto (Bi2Te3), que tiene una densidad electrónica diferente. Aunque también se pueden acceder a más materiales termoeléctricos según las aplicaciones necesarias, como las aleaciones de telurio de plomo (PbTe), silicio de germanio (SiGe) y bismuto de antimonio (BiSb) [Shilpa, M. 2023].

En una celda Peltier coexisten tres efectos termoeléctricos; sin embargo, únicamente el efecto Seebeck es responsable de la generación de un voltaje. El efecto Peltier se encuentra relacionado con el efecto Seebeck a través de las relaciones de Thomson. Por lo tanto, al modelar matemáticamente la generación eléctrica en las celdas Peltier, los tres efectos se reflejan de manera conjunta [Sampedro, O.F.B. 2022].

A) Efecto Seebeck:

El físico alemán Thomas Johan Seebeck descubrió el efecto Seebeck en 1821, quien descubrió accidentalmente que se produce un campo electromagnético entre los dos extremos de una placa de metal cuando están a diferentes temperaturas.

El efecto Seebeck consiste en calentar un extremo de una barra de metal mientras se enfría el otro lado (un gradiente de temperatura) dando como resultado una diferencia de potencial [Ramírez, J.A.V. 2018].

Ecuación Seebeck= (1)

$V = \alpha (Tc - Tf)$

V (Voltaje), α (Coeficiente Seebeck), Tc (Mayor temperature) y Tf (Menor temperatura) [Sampedro, O.F.B. 2022].

B) Efecto Peltier:

El efecto Seebeck resulta ser el recíproco del efecto Peltier, el físico francés Jean Charles Peltier descubrió este efecto en 1834; 13 años después de que se descubriera el Efecto Seebeck [Ramírez, J.A.V. 2018].

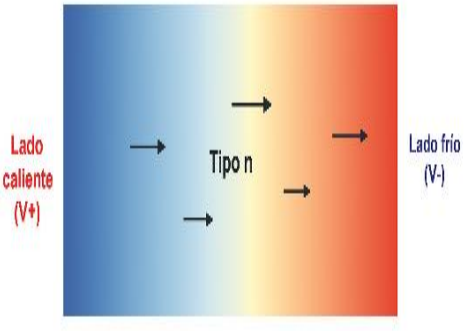


Fig. 2. Efecto Seebeck.

El efecto Peltier consiste en el enfriamiento o calentamiento de una conexión entre dos conductores diferentes cuando por ellos pasa una corriente eléctrica y que depende exclusivamente de la composición y temperatura de la union.

Ecuación Peltier= (2)

$Q = I (\pi B - \pi A)$

Q (Flujo de calor), I (Corriente), πB (Coeficiente Peltier material A) y πA (Coeficiente Peltier material B) [Shilpa, M. 2023].

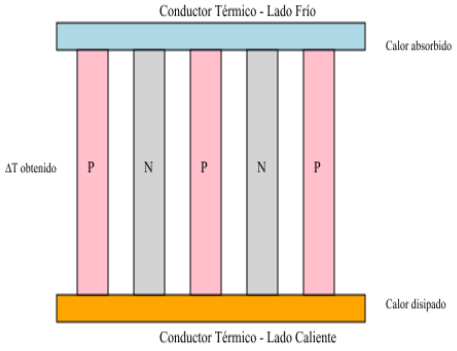


Fig. 3. Efecto Peltier.

C) Efecto Thomson:

El físico y matemático británico William Thomson descubrió este efecto en el año 1851, siendo él quien demostró una relación existente entre el efecto Seebeck y el efecto Peltier produciendo así el tercer efecto del llamado efecto termoeléctrico.

El efecto Thomson dice que el calor será absorbido si la corriente va del extremo más frío al extremo más caliente y el calor se disipará en el ambiente si la corriente va del extremo más caliente al extremo más frío [Ramírez, J.A.V. 2018].

Ecuación Thomson= (3)

$\pi = \alpha T$

π (Coeficiente Peltier),α (Coeficiente Seebeck) y T(Temperatura) [Ramírez, C.R. 2017].

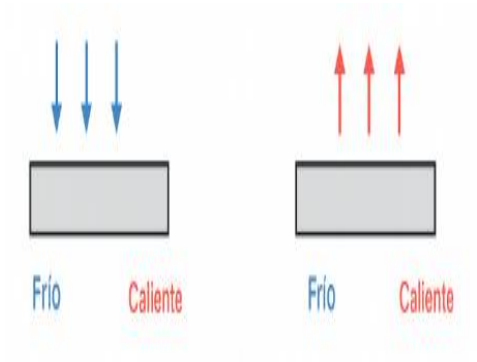


Fig. 4. Efecto Thomson.

Fig. 5. Vista general del prototipo termoeléctrico con celdas Peltier.

3. PRUEBAS EXPERIMENTALES Y ANALICIS DE CONFIGURACIONES DE CELDA PELTIER

Construcción del prototipo:

Para llevar a cabo las pruebas experimentales, se construyó un prototipo compuesto por 10 celdas Peltier modelo TEC1-12706.

El arreglo se montó sobre una estructura que permite la fijación segura del disipador en las caras frías de las celdas, así como la correcta exposición de las caras calientes a la fuente de calor concentrada. Se utilizó pasta térmica para asegurar el contacto térmico adecuado entre las celdas y en el disipador, garantizando una transferencia eficiente de calor. De esta manera, el sistema opera mediante fuentes pasivas de calor y frío: la radiación solar concentrada por el lente de Fresnel sobre las caras calientes y la disipación térmica en las caras frías a través del disipador de aluminio.

Para ajustar con precisión la distancia entre el lente Fresnel y las celdas Peltier, se diseñó una estructura mecánica con brazos móviles que permite acercar o alejar el lente respecto a la base. Este sistema de desplazamiento manual facilita la alineación del punto focal de acuerdo con la distancia focal teórica del lente y las condiciones solares del momento, lo que resulta esencial para lograr una concentración efectiva del calor sobre las caras calientes de las celdas.

Además del ajuste vertical, la estructura también fue diseñada con la capacidad de realizar desplazamientos horizontales hacia la izquierda o derecha. Esta característica permite reorientar el sistema manualmente cada media hora durante la fase experimental, de manera que el lente se mantenga alineado con los rayos solares el mayor tiempo posible a lo largo del día.

Gracias a esta doble movilidad, se optimiza la captación de energía solar, lo que se traduce en un mayor gradiente térmico y, por ende, en una mejor producción de energía eléctrica por parte del prototipo termoeléctrico.

A continuación, se presenta una imagen del prototipo:

Conexiones de las celdas: serie y paralelo:

Antes de llevar a cabo las pruebas, se definieron las condiciones de prueba, incluyendo el lugar, la fecha, el horario y el ángulo de inclinación del sistema, así como las dos configuraciones de conexión eléctrica para las celdas Peltier.

Las pruebas se realizaron en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico durante el mes de Agosto, siendo la primera el día 12 y la segunda el día 25.

En ambos casos, el horario de medición comprendió de las 6:30 a las 17:30 y el ángulo de inclinación utilizado fue de aproximadamente 81° respecto al plano horizontal, calculado a partir de la latitud del lugar y la declinación solar correspondiente a dicho mes.

Prueba 1, conexión en serie: Todas las celdas se conectan de manera secuencial, de modo que el voltaje total del arreglo es la suma de los voltajes individuales de cada celda, mientras que la corriente permanece constante.

Pueba 2, conexión en paralelo (5×2): Las celdas se organizaron en dos grupos de cinco celdas en serie, y ambos grupos se conectaron en paralelo. En este caso, el voltaje del arreglo corresponde al voltaje de un grupo de cinco celdas, mientras que la corriente total es la suma de las corrientes de ambos grupos, favoreciendo la entrega de mayor corriente a cargas con baja resistencia.

Estas configuraciones se establecieron con el propósito de determinar cuál de las dos presenta un mejor desempeño en términos de generación eléctrica bajo las mismas condiciones de prueba.

Celdas Peltier en serie:

Se seleccionó la hora en la que se obtuvo la mayor producción de energía con una temperature de 68.9°C en las caras calientes y 57.3°C en las caras frías de las celdas para mostrar los resultados:

Fig. 6. Prueba en serie de la mayor producción de energía.

Además, se elaboraron gráficas que muestran la evolución de diferencia de portencal y corriente generada durante todo el período de prueba:

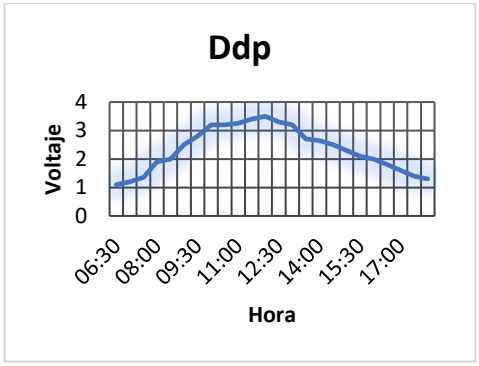


Fig. 7. Gráfica de Diferencia de potencial prueba 1.

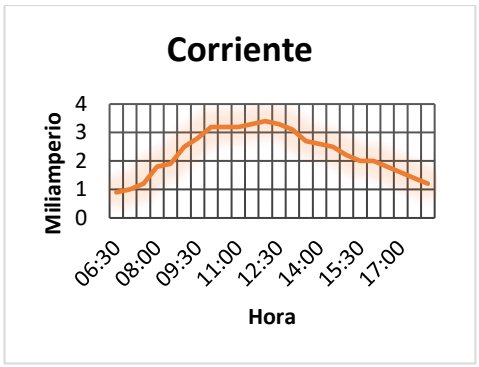


Fig. 8. Gráfica de Corriente prueba 1.

Celda Peltier en paralelo 5×2:

De manera similar, se seleccionó la hora de mayor producción para mostrar los valores medidos con 56°C en las caras calientes de las celdas y 43.7°C en las caras frías de las celdas.

Fig. 9. Prueba en paralelo de la mayor producción de energía.

Asimismo, se elaboraron las gráficas correspondientes a todo el período de prueba, permitiendo comparar visualmente la generación de energía entre la configuración en serie y la configuración en paralelo:

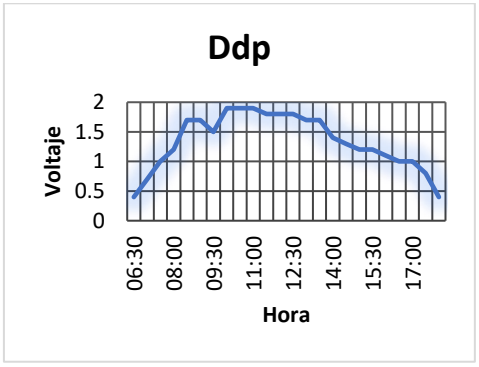


Fig.10. Gráfica de Diferencia de potencial prueba 2.

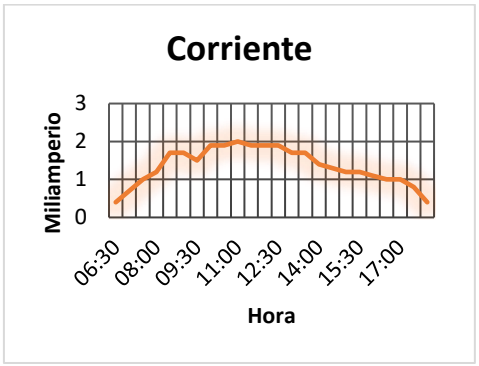


Fig. 11. Gráfica de Corriente prueba 2.

Selección de la configuración óptima y simulación:

Tras comparar los resultados obtenidos en ambas configuraciones, se determinó que la conexión en serie de las 10 celdas presentó una mayor producción de energía.

Los factores que influyen en esta diferencia de rendimiento son:

1.- Contacto térmico desigual: Las pequeñas variaciones en el contacto entre las celdas, el disipador o la superficie de concentración de calor provocan diferencias en la transferencia térmica. Esto genera que algunas celdas alcancen mayores temperaturas en sus caras calientes o menores en las frías, produciendo una distribución no uniforme del gradiente térmico.

2.- Pérdidas por resistencia interna de las celdas: Cada celda Peltier presenta una resistencia eléctrica y térmica propias. Cuando el gradiente de temperatura no es homogéneo, las pérdidas internas se incrementan y las celdas con menor diferencial térmico entregan menos potencia, afectando el rendimiento global del arreglo.

3.- Desajuste del punto de operación y corrientes internas inversas: En la configuración en paralelo, las celdas deben trabajar bajo el mismo voltaje.

Sin embargo, si una o varias presentan un menor voltaje debido a una diferencia térmica, pueden comportarse como cargas para las demás, generando corrientes internas en sentido opuesto. Este fenómeno reduce la corriente útil total y, en consecuencia, la energía eléctrica disponible en el sistema.

Simulaciones:

Con base en esta observación, se procedió a simular en MATLAB Simulink® la configuración en serie al haber demostrado un mejor desempeño en la generación de energía durante las pruebas experimentales. Cada celda Peltier fue modelada considerando un coeficiente Seebeck de 0.031 V/K, una resistencia interna de 2.2 Ω, una conductancia térmica de 0.76 W/K, una temperatura de 68.9°C en las caras calientes y una de 57.3°C en las caras frías. La simulación permitió también comparar los resultados experimentales con los obtenidos en el modelo, evaluando la eficiencia del sistema y la energía producida durante el período de prueba. Finalmente, esta comparación entre experimentación y simulación ofrece una validación del prototipo y proporciona una base sólida para optimizar futuras implementaciones del sistema termoeléctrico, con el objetivo de maximizar la generación y aprovechamiento de energía.

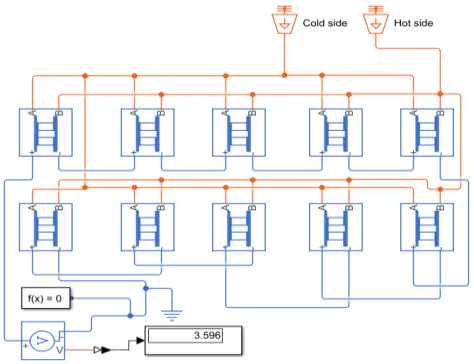


Fig. 12. Simulación de la mayor diferencia de potencial generado en el arreglo de 10 celdas Peltier conectadas en serie.

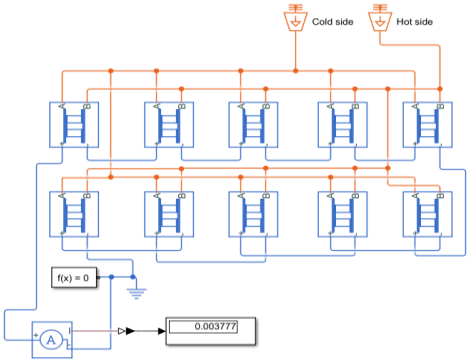


Fig. 13. Simulación de la mayor corriente generada en el arreglo de 10 celdas Peltier conectadas en serie.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo permitió analizar experimental y mediante simulación el comportamiento de un sistema de generación termoeléctrico basado en celdas Peltier, empleando un concentrador solar tipo lente Fresnel como fuente de calor pasivo y un disipador de aluminio como elementos de enfriamiento pasivo. En la etapa experimental se realizaron dos configuraciones distintas de conexión: 10 celdas Peltier en serie y un arreglo paralelo de 5×2. Los resultados mostraron que, bajo las mismas condiciones de irradiancia solar, la conexión en serie alcanzó una mayor producción de energía eléctrica en comparación con el arreglo en paralelo. Esto se debe principalmente a que en la configuración en paralelo la distribución no uniforme de temperaturas entre las celdas provoca desequilibrios, generando pérdidas y reduciendo la eficiencia global y por otro lado, el arreglo en serie se mostró más robusto frente a dichas diferencias, maximizando el aprovechamiento de la energía térmica disponible.

La etapa de simulación en MATLAB/Simulink ® confirmó los resultados y eso ayuda a que posteriormengte se pueda acoplar al sistema un convertidor DC-DC Boost para elevar la diferencia de potencial de salida lo cual constituye un paso fundamental hacia la implementación práctica del sistema en aplicaciones de pequeña escala, como la alimentación de lámparas LED de escritorio u otros dispositivos de baja potencia. En conclusión, se identificaron desafíos como la distribución térmica no uniforme, las pérdidas por resistencia interna y la necesidad de un sistema de seguimiento solar automatizado, que deberán ser abordados en investigaciones futuras para incrementar la eficiencia global y la escalabilidad del sistema.

REFERENCIAS

*Aridi, R., Faraj, J., Ali, S., Lemenand, T. & Khaled, M. (2021) 'Thermoelectric power generators: state-of-the-art, heat recovery method, and challenges', Electricity, 2(3), pp.359–386.

*Faheem, M., Abu Bakr, M., Ali, M., Majeed, M.A., Haider, Z.M. & Khan, M.O. (2024) 'Evaluation of efficiency enhancement in photovoltaic panels via integrated thermoelectric cooling and power generation', Energies, 17(11), p.2590.

*Gomaa, M.R. & Rezk, H. (2020) 'Passive cooling system for enhancement of the energy conversion efficiency of thermo-electric generator', Energy Reports, 6, pp.687–692.

*Iyer, R. & Ghosh, A. (2023) 'Investigation of integrated and non-integrated thermoelectric systems for buildings—A review', Energies, 16(19), p.6979.

*Makola, C.S., Le Roux, P.F. & Jordaan, J.A. (2023) 'Comparative analysis of lithium-ion and lead–acid as electrical energy storage systems in a grid-tied microgrid application', Applied Sciences, 13(5), p.3137.

*Nimmagadda, L.A., Mahmud, R. & Sinha, S. (2021) 'Materials and devices for on-chip and off-chip Peltier cooling: a review', IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 11(8), pp.1267–1281.

*Ramírez, C.R., Lizarazo, G.M. & Duarte, E.V. (2017) 'Termoelectricidad: uso de las celdas Peltier en el campo de la refrigeración y sus principales aplicaciones', INVENTUM, 12(22), pp.9–16.

*Ramírez, J.A.V., Cardona, W.F.A. & Buchelli, J.B. (2018) 'Generation of self-sustainable electrical energy for the Unidad Central del Valle del Cauca, by the use of Peltier cells', International Journal of Renewable Energy Sources, 3.

*Ridwan, M., Gasulla, M. & Reverter, F. (2025) 'Principle and applications of thermoelectric generators: a review', Sensors, 25(8), p.2484.
*Sampedro, O.F.B. et al. (2022) 'Implementación de un sistema de generación eléctrica mediante la aplicación del efecto Seebeck con celdas Peltier para aprovechar el calor residual de gases de procesos industriales', Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 7(6), pp.1719–1755.
*Seyednezhad, M. & Najafi, H. (2021) 'Solar-powered thermoelectric-based cooling and heating system for building applications: a parametric study', Energies, 14(17), p.5573.
*Shilpa, M., Raheman, M.A., Aabid, A., Baig, M., Veeresha, R. & Kudva, N. (2023) 'A systematic review of thermoelectric Peltier devices: applications and limitations', FDMP - Fluid Dynamics & Materials Processing, 19(1), pp.187–206.
*Singh, B. (2014) 'The effects of temperature difference and compressive force to the electrical characterization of Peltier cell for artificial concentrated solar power thermoelectric application', Journal of Mechanical Engineering (JMechE), 11(1), pp.15–30.
*Skala, A. & Waradzyn, Z. (2018) 'Investigation and determination of efficiency of the waste heat recovery system using Peltier modules', in 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS). IEEE, pp.1–5.
*Snyman, L.W. & Maeko, G. (2021) 'Design and development of a low-cost system to convert solar thermal energy into electricity for households in South Africa using solar concentrators', Journal of Energy in Southern Africa, 32(4), pp.102–116.
*Win, S.L.Y., Chiang, Y.-C., Huang, T.-L. & Lai, C.-M. (2024) 'Thermoelectric generator applications in buildings: a review', Sustainability, 16(17), p.7585.

Portable Power Prototype Powered by Solar or Wind Energy

Ortiz Lagunas Gabriela Yalit *, Hernández-López M. I.*, Rodríguez Hernández Juan David, * Serrano-Arellano J*

**División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / IT de Pachuca. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo., C.P. 42080. México.*
e-mail: juan.sa@pachuca.tecnm.mx

Abstract:

This work presents the design, simulation, and performance evaluation of SkyVolt**,** a portable hybrid energy station that combines solar and wind generation for low-power applications in off-grid or emergency scenarios. The prototype integrates a monocrystalline photovoltaic module, a vertical-axis wind turbine, a hybrid solar–wind controller, a 12 V lead-acid battery, and a pure sine wave inverter. Aerodynamic behavior was analyzed through CFD simulations in *SolidWorks Flow Simulation*, identifying flow recirculation zones and torque generation under standard environmental conditions. The electrical subsystem was modeled in *MATLAB–Simulink* to assess power balance, voltage stability, and energy generation under variable wind speeds (6–12 m/s). Results indicate that the prototype can provide a continuous power output of 20–25 W**,** with a global conversion efficiency between 15 % and 25 %**,** depending on the active source. Structural simulations confirmed the mechanical reliability of the solar module under moderate wind loads, while electrical simulations validated the stability of the hybrid configuration. Overall, the study demonstrates the technical feasibility, sustainability, and practical applicability of small-scale hybrid renewable systems for rural communities, emergency deployments, and sustainable tourism, promoting the transition toward clean and autonomous energy solutions**.**

Keywords: **Hybrid renewable system, solar-wind generation, portable energy station, CFD simulation, MATLAB–Simulink.**

1. INTRODUCCIÓN

El acceso universal a la energía eléctrica sigue representando un desafío persistente en regiones rurales, comunidades aisladas y zonas sin conexión a la red tradicional, particularmente en países en desarrollo. A pesar de los avances en infraestructura energética, millones de personas carecen de suministro eléctrico confiable, lo que limita su calidad de vida, restringe el acceso a tecnologías esenciales y obstaculiza el desarrollo social y económico. (WHO,2021, Grupo Banco Mundial 2018). En este contexto, los sistemas portátiles de generación energética basados en fuentes renovables emergen como una solución viable, escalable y sostenible, particularmente en aplicaciones de emergencia, misiones humanitarias, actividades en campo y situaciones de aislamiento prolongado. Al integrar ambos recursos renovables en una combinación óptima, se puede reducir parcialmente el impacto de la naturaleza variable de los recursos solar y eólico, y el sistema en su conjunto se vuelve más fiable y económico de operar. (Badwawi et al.2015).

La selección de estudios se centró en investigaciones recientes (2018–2025) que abordan la integración solar–eólica desde enfoques experimentales, numéricos y de optimización, con especial atención a revisiones que proponen modelos compactos o portátiles. Esta muestra permitió identificar las principales brechas tecnológicas y conceptuales en la micro generación híbrida. Los sistemas híbridos que combinan energía solar y eólica se distinguen por su notable complementariedad, ya que ambas fuentes presentan comportamientos opuestos a lo largo del día y del año: la radiación solar alcanza sus valores máximos durante las horas diurnas y en las estaciones cálidas, mientras que el recurso eólico suele intensificarse durante la noche y en periodos más fríos (Alhijazi et al., 2023; Guo et al., 2018;). Esta relación compensatoria permite incrementar la estabilidad del suministro energético y disminuir la necesidad de grandes sistemas de almacenamiento, fortalecida además por los avances tecnológicos recientes en ambos campos (Hassan et al., 2023; Khurshid et al., 2024). No obstante, para lograr un desempeño óptimo es indispensable aplicar estrategias de

optimización multicriterio que consideren simultáneamente la eficiencia energética, los costos y los impactos ambientales (Giedraityte et al., 2025).

Aunque se han realizado avances importantes en este tipo de configuraciones, todavía existe una demanda significativa por modelos integrados que combinen múltiples fuentes renovables bajo criterios de alta eficiencia, adaptabilidad climática y viabilidad económica (León Gómez et al., 2023; Thirunavukkarasu et al., 2023). La mayoría de las investigaciones actuales se concentran en componentes o metodologías de optimización aisladas, lo que ha generado una falta de soluciones globales que aprovechen plenamente las ventajas sinérgicas del acoplamiento solar–eólico (Hassan et al., 2023; Giedraityte et al., 2025). En su revisión, Hassan et al. (2023) destacaron precisamente esta limitación, señalando la ausencia de marcos integrados de control y optimización que impiden explotar todo el potencial del sistema híbrido. Por otra parte, las variaciones estacionales y climáticas —como los cambios en irradiancia, velocidad del viento y temperatura ambiental— subrayan la importancia de evaluaciones continuas del rendimiento para garantizar la fiabilidad operativa a lo largo del año (I.E.A., 2023; Bamisile et al., 2024).

En este sentido, el diseño y construcción de un prototipo de baja potencia de un centro de energía híbrido solar-eólico busca demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental de estos sistemas en contextos reales. Además, este prototipo puede tener aplicaciones en múltiples escenarios: desde el suministro energético autónomo para viviendas, talleres o zonas de emergencia, hasta su uso con fines educativos y de divulgación científica sobre el uso responsable de los recursos naturales.

Este proyecto contribuye así al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo relacionado con el acceso a energía asequible y no contaminante (ODS 7), la acción por el clima (ODS 13), y la promoción de infraestructuras resilientes e inclusivas (ODS 9). También fortalece el enfoque hacia la autosuficiencia energética, el aprovechamiento de recursos locales y la concientización sobre el uso responsable de la energía.

A diferencia de otros sistemas híbridos portátiles, este prototipo incorpora una integración compacta de subsistemas eléctricos, aerodinámicos y estructurales en una sola unidad portátil de bajo costo, optimizada mediante simulaciones CFD y eléctricas. Su diseño optimiza la relación entre rendimiento, peso y portabilidad, priorizando la autonomía energética en contextos de emergencia o zonas sin red eléctrica. Este enfoque integral y de bajo costo representa un avance frente a soluciones que estudian componentes aislados o no validan la interacción aerodinámica–eléctrica de manera conjunta.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño de prototipo

Se busco en el prototipo, un equilibrio entre rendimiento energético, simplicidad de implementación y adaptabilidad a distintos escenarios de uso real, respondiendo a los desafíos actuales de acceso a energía limpia en pequeña escala, la cual se muestra en la Figura 1. Diseño del prototipo híbrido. Se eligió un aerogenerador de eje vertical de tres aspas (por ejemplo: baja velocidad de arranque, menor ruido, diseño compacto para entornos urbanos o portátiles).

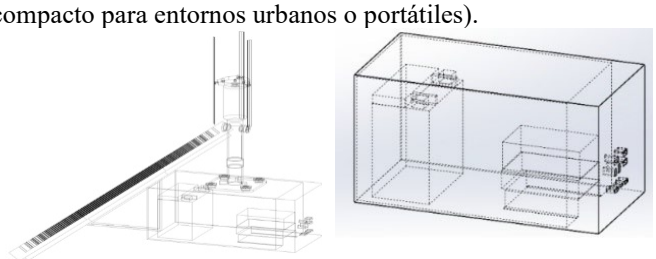


Figura1. Diseño isométrico del prototipo híbrido.

2.2. *Simulación CFD del generador eólico*

Para analizar el desempeño aerodinámico del generador eólico, se utilizó el módulo Flow Simulation de SolidWorks, con un enfoque CFD. Se estableció un dominio computacional con entrada de velocidad y salida a presión ambiente, aplicando condiciones adiabáticas sin deslizamiento en las paredes. La simulación permitió visualizar líneas de corriente, velocidad, turbulencias y calcular torques inducidos por el viento. Condiciones: Configuración de ambiente: 15 $°C$ y condiciones estándar, Malla inicial con 35000 celdas y 1324 en contacto sólido., Convergencia en 154 iteraciones, en un tiempo de 26 segundos.

El análisis CFD permitió identificar zonas de alta presión en la cara de ataque y velocidades máximas de X m/s en la región superior, lo que confirma el adecuado aprovechamiento del flujo incidente.

2.3. *Modelado y simulación eléctrica en Simulink.*

Sistema híbrido en entorno MATLAB-Simulink Figura 2. La energía generada por ambas fuentes se gestiona a través del controlador híbrido, que prioriza la fuente solar durante el día y la eólica durante la noche, garantizando un suministro continuo hacia la batería y el inversor.

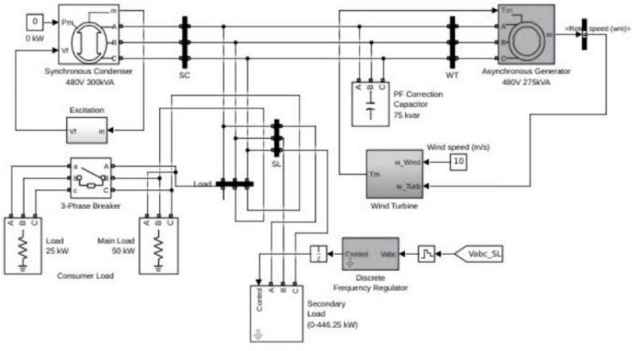


Figura 2. Circuito sistema de generación de energía en Simulink.

El generador eólico se configuró como un generador asíncrono trifásico, acoplado a un aerogenerador vertical cuya potencia se ajustó a velocidades de viento comprendidas entre 6.0 y

12.0 m/s. Para garantizar estabilidad en la operación, se incorporó un banco de capacitores destinado a la corrección del factor de potencia y un condensador síncrono para la regulación dinámica de tensión véase Fig. 4. El subsistema fotovoltaico se modeló a partir de módulos monocristalinos con eficiencia del 19 %, integrados a un controlador MPPT híbrido solar–eólico, lo que permitió simular el proceso de optimización en tiempo real.

2.4. *Componentes de prototipo.*

El prototipo se integró con los siguientes componentes, Tabla 1.

Tabla 1. Componentes que integran prototipo de híbrido de energía solar y eólica.

Concepto	Imagen
Aerogenerador de eje vertical	
Panel Solar	
Controlador híbrido solar-eólico (800 W eólico / 1000 W solar)	
Batería STEREN BR-1207	
Inversor de corriente portátil	
Base de prototipo	

2.5 Ensamble del prototipo

En la Figura 3, se muestra el ensamble del prototipo híbrido. El ensamble final permitió comprobar la conexión efectiva entre fuentes, controlador y sistema de almacenamiento, verificándose la carga de dispositivos de baja potencia (teléfono móvil, lámpara LED, laptop, etc.).

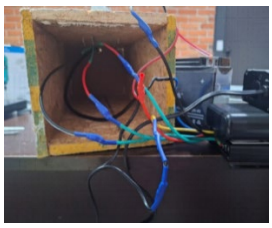


Figura 3. Ensamble de prototipo híbrido.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la simulación del generador eólico muestran un patrón de flujo con zonas de recirculación en la parte posterior del modelo y gradiente de velocidad concentrados en la base. En las líneas de velocidad y densidad Figura 4 y vectores de velocidad Figura 5, permitieron identificar zonas críticas de turbulencia y arrastre.

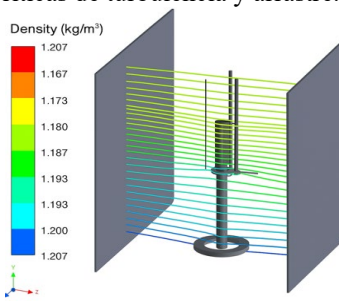


Figura 4. Densidad.

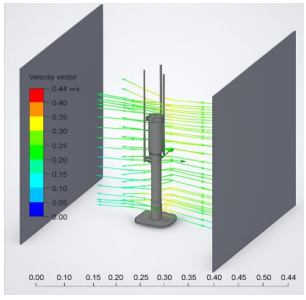


Figura 5. Vectores de velocidad

El modelo CFD proporciona una herramienta efectiva para el análisis aerodinámico preliminar. En las líneas de corriente se observó la trayectoria de flujo del objeto y en las zonas de recirculación en la parte posterior, Figura 6. Los campos de velocidad presentan velocidades entre 0 y 14.06 m/s, los gradientes se observan en zonas inferiores y cercanas al cuerpo del modelo. La densidad del fluido es mínima dentro del túnel de viento (Flujo casi incompresible). La convergencia de resultados indica estabilidad después de ~ 40 iteraciones. velocidad máxima (31.45 *mi/h*) y torque (-2.16 *lbf·in)*

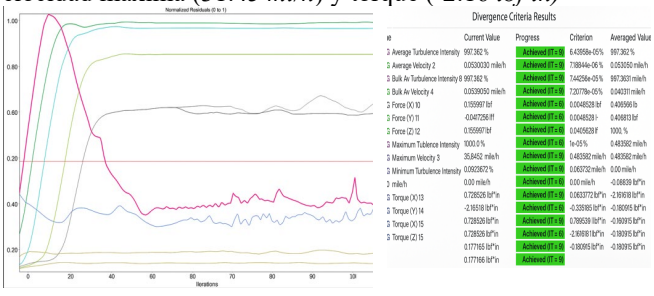


Figura 6. Grafica con tabla de datos.

En la simulación CFD de un túnel de viento interno, se confirman zonas críticas de turbulencia y arrastre. Los valores de torque y fuerza obtenidos podrán utilizarse para validación estructural y mejora de diseño.

En el panel solar Figura 7, se empleó silicio como material con comportamiento elástico lineal, obteniendo un esfuerzo máximo Von Mises de 1.47 *MPa* , un desplazamiento máximo de 7.11 μm y un factor de seguridad > 81. Estos valores indican que el diseño es estructuralmente seguro ante cargas moderadas.

Figura 7. Panel solar

El diseño y las simulaciones realizadas en SolidWorks permitieron validar la estructural del panel solar ante cargas moderadas, así como el comportamiento aerodinámico del generador eólico. Las simulaciones CFD mostraron zonas críticas de turbulencia y arrastre, lo cual proporciona información clave para futuras mejoras en el diseño del generador o del flujo de aire.

Estos valores de torque fueron tomados como base para estimar la potencia mecánica disponible en el modelado eléctrico desarrollado en Simulink.

El modelo desarrollado en MATLAB-Simulink permitió evaluar el comportamiento eléctrico del sistema bajo diez escenarios con velocidades de viento comprendidas entre 6,0 y 12,0 m/s, Tabla 2. Las variables analizadas fueron potencia activa, energía acumulada, estabilidad de voltaje y compensación de potencia reactiva. Los resultados mostraron un incremento progresivo de la potencia entregada y de la energía generada conforme aumentó la velocidad del recurso eólico. En particular, se cuantificó un aumento del 64,25 % en la potencia pico y del 61,7 % en la energía total generada, respecto al escenario base de 6,0 m/s. El sistema mantuvo una tensión estable en el rango de 12,1–12,4 V, con variaciones inferiores a ±0,2 V, lo que evidencia una operación confiable.

Tabla 2. Resultados generales de las simulaciones.

Simulación	Velocidad viento (m/s)	Potencia máxima (KW)	Potencia mínima (KW)	Energía Generada (KWh)
1	6.0	120.0	100.0	1.83
2	6.7	128.6	106.9	1.96
3	7.3	137.10	113.8	2.08
4	8.0	145.7	120.7	2.21
5	8.7	154.3	127.6	2.33
6	9.3	162.9	134.5	2.46
7	10.0	171.4	141.4	2.58
8	10.6	180.0	148.3	2.71
9	11.3	188.6	155.2	2.83
10	12.0	197.10	162.10	2.96

Los resultados se compararon con dispositivos comerciales equivalentes (Tabla 3).

Tabla 3. Comparativa de rendimiento entre prototipo (Skyvolt) y dispositivos comerciales

Dispositivo	Fuente energética	Potencia continua (W)	Eficiencia global (%)	Peso (kg)
(SkyVolt) Prototipo	Solar + Eólica	20-25	15-25	6.8
Jackery	Solar	16-18	12-18	3.1
Bluetti	Solar	20-25	18-22	
Ecoflow River	Solar	25-30	20-24	5
WindPax	Eólico	15-20	10-15	4.2

Se observa que, aunque su potencia es similar a la de modelos solares portátiles, skyvolt ofrece la ventaja de operación híbrida (solar–eólica), garantizando autonomía continua incluso en ausencia de irradiancia solar, orientado a aplicaciones de bajo consumo donde la portabilidad y el suministro híbrido son críticos.

Eficiencia estimada del sistema hibrido (η).

Los paneles solares monocristalinos comerciales suelen tener eficiencias entre 18% y 22%, dependiendo de la calidad de los materiales y del fabricante (NREL, 2023).
La eficiencia práctica de pequeños aerogeneradores oscila entre 30% y 45%, ddependiendo de la geometría del rotor, el coeficiente de potencia y las condiciones de viento (Hau, 2022).Las baterías de plomo-ácido muestran eficiencias de ciclo carga–descarga entre 80 % y 90 %**,** afectadas por pérdidas térmicas y químicas (Linden & Reddy, 2020).Los inversores residenciales de onda senoidal pura logran eficiencias de hasta 95%, aunque en condiciones reales de operación tienden a valores cercanos al 90 % **(**Rahman et al., 2020).

Se consideran eficiencias basadas en literatura técnica: ηsolar ≈ 20 %, ηeólico ≈ 30 %, ηbatería ≈ 85 % y ηinversor ≈ 90 %. Estas cifras se encuentran dentro de los rangos reportados para sistemas fotovoltaicos, microeólicos, baterías de plomo-ácido e inversores de baja potencia.

$$\eta total = \eta fuente \times \eta batería \times \eta inversor$$

Para la fuente solar:
$\eta total,solar=0.20 \times 0.85 \times 0.90 = 0.153 = 15.3\%$

Para la fuente eólica:
$\eta total,eólica = 0.30 \times 0.85 \times 0.90 = 0.230 = 23\%$

En operación híbrida balanceada, considerando la alternancia de ambas fuentes y las pérdidas del sistema, la eficiencia práctica global del sistema se encuentra entre 15 % y 25 en concordancia con los valores reportados para sistemas híbridos portátiles de baja potencia.

Los resultados confirman la viabilidad técnica del sistema híbrido a pequeña escala. El análisis CFD y estructural respalda la estabilidad del diseño, mientras que la simulación eléctrica demuestra un comportamiento eficiente y confiable en escenarios variables de viento y radiación.

4.CONCLUSIONES

El prototipo de estación energética portátil híbrido (SkyVolt), que combina generación solar y eólica, demostró ser una alternativa funcional, sostenible y replicable para el suministro de energía en entornos aislados, de emergencia o con acceso limitado a la red eléctrica. Los ensayos y simulaciones confirmaron su capacidad para entregar una potencia continua del orden de 20–25 W en condiciones mixtas (solar + eólica), asegurando autonomía operativa para aplicaciones de bajo consumo.

Aunque la potencia de salida (20–25 W) corresponde a un rango bajo, esta capacidad resulta suficiente para alimentar dispositivos esenciales como teléfonos móviles, lámparas LED, radios o pequeños equipos médicos portátiles. Por tanto, el prototipo hibrido puede aplicarse en contextos de emergencia, turismo sustentable, educación ambiental y suministro energético autónomo en comunidades rurales, demostrando su utilidad práctica en escenarios reales fuera de red.

Además de su desempeño técnico, el sistema aporta beneficios ambientales al reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Su diseño modular y portátil facilita su implementación en comunidades rurales, turismo sustentable y atención a emergencias, donde el acceso a energía limpia es limitado.

Entre las oportunidades de mejora identificadas se destacan el aumento de la capacidad de almacenamiento, la incorporación de monitoreo inteligente y un rediseño estructural más ligero y eficiente. Estas optimizaciones permitirían ampliar su autonomía, rendimiento y confiabilidad, consolidando el prototipo como una solución innovadora y accesible dentro de la transición hacia fuentes limpias de energía.

REFERENCIAS

Alhijazi, Ayman & Almasri, Radwan & Alloush, Ahmad Firas. (2023). A Hybrid Renewable Energy (Solar/Wind/Biomass) and Multi-Use System Principles, Types, and Applications: A Review. Sustainability. 15. 10.3390/su152416803

Badwawi, R. A., Abusara, M., & Mallick, T. (2015). A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System. Smart Science, 3(3), 127–138. https://doi.org/10.1080/23080477.2015.11665647

Bamisile, Oluwatoyosi & Cai, Dongsheng & Adun, Humphrey & Dagbasi, Mustafa & Chiagoziem Chima, Ukwuoma & Huang, Qi & Johnson, Nathan & Bamisile, Olusola. (2024). Towards Renewables Development: Review of Optimization Techniques for Energy Storage and Hybrid Renewable Energy Systems. Heliyon. 10. e37482. 10.1016/j.heliyon. 2024.e37482.

Chang, En-Chih. (2020). High-Performance Pure Sine Wave Inverter with Robust Intelligent Sliding Mode Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Applications. Micromachines, 11(6), 585–. doi:10.3390/mi11060585

Giedraityte, A.; Rimkevicius, S.; Marciukaitis, M.; Radziukynas, V.; Bakas, R. (2025) Hybrid Renewable Energy Systems—A Review of Optimization Approaches and Future Challenges. Appl. Sci 15, 1744. https://doi.org/ 10.3390/app1504174

Guo, Shaopeng; Liu, Qibin; Sun, Jie; Jin, Hongguang. (2018). A review on the utilization of hybrid renewable energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91(), 1121–1147. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.105

Grupo Banco Mundial (2018). El acceso a la energía ocupa un lugar central en el desarrollo. https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/04/18/access-energy-sustainable-development-goal-7#:~:text=La%20falta%20de%20capacidad%20de,con%20conexi%C3%B3n%20a%20la%20red. (Consultado 12 julio 2025)

Hassan Qusay, Sameer Algburi, Aws Zuhair Sameen, Hayder M. Salman, Marek Jaszczur,(2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications.Results in Engineering, Volume 20,101621,ISSN 2590-1230,https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621.

Hau, E. (2022). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics (5th ed.). Springer. DOI:10.1007/3-540-29284-5

Hifsa Khurshid, Bashar S. Mohammed, Ahmad Mahamad Al-Yacouby, M.S. Liew, Noor Amila Wan Abdullah Zawawi, (2424). Analysis of hybrid offshore renewable energy sources for power generation: A literature review of hybrid solar, wind, and waves energy systems, Developments in the Built Environment,Volume 19, 100497,ISSN 2666-1659,https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100497.

I.E.A. (2023). *World Energy Outlook 2023: Global renewable integration and system reliability*. International Energy Agency. https://www.iea.org

León, Juan & De León Aldaco, Susana & Aguayo, Jesus. (2023). A Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Architectures, Battery Systems, and Optimization Techniques. Eng. 4. 1446-1467. 10.3390/eng4020084.

M. Thirunavukkarasu, Yashwant Sawle, Himadri Lala (2023) A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 176,113192, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113192.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). Best Research-Cell Efficiency Chart. U.S. Department of Energy. Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL.

Rahman, M. A., Hasan, M., & Ali, M. H. (2020). High-performance pure sine wave inverter for photovoltaic applications. Micromachines, 11(6), 585. https://doi.org/10.3390/mi11060585

Reddy, T. B., & Linden, D. (2011). Linden's handbook of batteries (4th ed.). McGraw-Hill. https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071624213.

WHO. (2021) El acceso universal a la energía sostenible seguirá siendo inalcanzable, a menos que se aborden las desigualdades. https://www.who.int/es/news/item/07-06-2021-global-launch-tracking-sdg7-the-energy-progress-report#:~:text=Desde%202010%2C%20m%C3%A1s%20de%201000%20millones%20de,en%20zonas%20fr%C3%A1giles%20y%20afectadas%20por%20conflictos. (Consultado 12 julio 2025)

Solar Irradiance Estimation using Extended Kalman Filter: Application in Chicoloapan, Mexico

Rojas Michael [*] **Ramos-García Fernanda** [**]
Sanchez-Reyes Luz Elena [*] **Hernandez-Rivera Daniel** [*]
Hernandez-Juarez Brenda Beatriz [*] **Lopez-Castro Eduardo** [*]

[*] *Tecnológico de Estudios Superiores Chicoloapan, Camino al Monte s/n, esquina con Camino a Tlalmimilolpan, Loma de Guadalupe., 56380 Ejido de Chicoloapan, Méx., Méx.(e-mail: michael.rojas@teschic.edu.mx,elena.sanchez@teschic.edu.mx, daniel.hernandez@teschic.edu.mx, brenda.hernandez@teschic.edu.mx,eduardo.lopez@chicoloapan.tecnm.mx).*
[**] *Facultad de Ingeniería UNAM, Escolar 04360, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX(e-mail: ferramosgarcia@gmail.com)*

Abstract:
This article presents the development and implementation of an Extended Kalman Filter (EKF) for estimating solar irradiance under variable atmospheric conditions. The motivation behind this methodology arises from the lack of atmospheric measurements, the presence of imprecise readings from conventional pyranometers, and measurements affected by intrinsic instrument errors, as well as Gaussian noise and atmospheric disturbances that influence the behavior of the measuring devices.
To address this issue, a nonlinear state model was formulated, combining sensor measurements with predictions from a clear-sky physical model, allowing for the simultaneous estimation of the actual irradiance and the standard deviation of the measuring instrument. Experimental validation was carried out for the geographical location of Chicoloapan, State of Mexico (19.4167° N, 98.9000° W, 2250 m), demonstrating an estimation error close to 20%.
The algorithm showed robustness under various atmospheric conditions, is computationally efficient for real-time applications, and can be used for solar resource forecasting or for designing controllers in photovoltaic applications.

Keywords: Solar Irradiance, Extended Kalman Filter, Renawable Energy.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la búsqueda de generación de energía eléctrica con fuentes menos contaminantes es un objetivo principal de la transición energética, esto ha situado a la generación de energía a través de sistemas fotovoltaicos como una solución primaria esencial en la matriz energética global. México, particularmente la región central que incluye el Estado de México, tiene un potencial excepcional con irradiancia global horizontal anual que supera los $5.5\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}\,d^{-1}}$ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2023). El uso eficiente del recurso solar necesita un estudio atmosférico para obtener mediciones de irradiancia precisas que ayuden a generar una proyección adecuada del recurso solar; por esta razón;el uso de algoritmos de optimización y estimación son de gran importancia para mejorar el diseño de sistemas fotovoltaicos, el pronóstico de generación, la operación de red y la evaluación de desempeño de las plantas solares.

Los piranómetros, son los instrumentos de medición estándar para conocer la irradiancia solar global, estos instrumentos presentan desafíos técnicos significativos que impactan la calidad de los datos Vignola et al. (2012), algunos de estos desafios son los siguientes:

- **Falta de calibración**: Existen cambios progresivos de sensibilidad en el instrumento causados por el envejecimiento de los componentes que hace que se requiera una calibración más periódica.
- **Efectos térmicos**: Existen variaciones en la respuesta espectral (componentes de alta frecuencia) propia de los pironometros y en la linealidad del instrumento de medición ocasionados por cambios de temperatura.
- **Efectos coseno**: Errores angulares dependientes de la posición solar y la mala colocación del instrumento de medición.
- **Presencia de tierra en el instrumento**: La Acumulación de partículas reduce la transmitancia óptica por lo tanto las lecturas del dispositivo se ven comprometidas.
- **Ruido aleatorio**: Las perturbaciones atmosféricas de alta frecuencia y ruido electrónico provocan ruido de tipo Gaussiano que afectan de manera aditiva a las mediciones del dispositivo

Las limitaciones enunciadas anteriormente así como la falta de energía eléctrica por algunos periodos son particularmente críticas en localidades como Chicoloapan, donde la altitud (2250 m) y condiciones atmosféricas específicas introducen variabilidades adicionales en las mediciones.

1.1 Estado del Arte en Técnicas de Estimación

Desde la perspectiva de sistemas dinámicos existen diversos algoritmos de estimación que se emplean en la reconstrucción de señales con base en el conocimiento mínimo de comportamiento del sistema, desde los métodos de estimación basados en modelos matemáticos, hasta las metodologías basadas en *machine learning* y ciencias de datos. De acuerdo a lo anterior, diversas aproximaciones han sido propuestas para estimar y mejorar la calidad de mediciones de irradiancia, entre algunos de los trabajos más importante se encuentra:

- **Métodos estadísticos**: En Lorenz et al. (2024) se hace un análisis de las mediciones de años anteriores para realizar un pronóstico de la irradiancia, en este trabajo se plantean varios tipos de algoritmos para poder realizar este pronóstico desde el manejo estadístico, hasta el análisis basado en datos.
- **Técnicas con redundancia en el sensado**: En Hammer et al. (2003) buscan tener una redundancia en la información con información obtenida desde sensores satelitales para poder estimar de a través de dichas imágenes la irradiancia a través del tiempo.
- **Enfoque basados en modelos**: En Ineichen (2008) se plantea el modelo matemático del la dispersión del agua en la atmosfera y de acuerdo a este modelo tomando como salida la irradiancia, es posible estimar su valor considerando diferentes porcentajes de humedad y horas del día.

Si bien, los métodos descritos anteriormente ayudan a estimar y pronosticar el comportamiento de la irradiancia, presentan limitaciones técnicas debido a la alta necesidad de calibración en algunos sensores así como el alto desempeño computacional necesario para poder implementar algunos algoritmos, además que ninguno de los métodos mencionados ayudan a resolver los problemas de ruido presentes en los instrumentos de medición debido a las condiciones propias del instrumento a condiciones ambientales. Por esta razón en este trabajo se desarrollo un modelo de estados no lineales que busca integrar las dinámicas atmosféricas con parámetros obtenidos de instrumentos de medición para poder estimar el valor de la irradiancia, se plantea el algoritmo EKFcomputacionalmente eficiente para operación en tiempo real y poder estimar y robustizar el uso de instrumentos de medición, y finalmente se muestra una evaluación exhaustiva con datos reales de condiciones atmosféricas variables para comprobar el algoritmo de estimación. De acuerdo a esto el presente articulo tiene la siguiente organización, primero, se presenta una introducción para motivar y mostrar el problema que se abordará, en la segunda parte se muestra la metodología empleada para obtener el modelo matemático y el algoritmo de estimación, en la siguiente sección se muestra la implementación del algoritmo así como el análisis de los resultados y por último se muestran algunas conclusiones y trabajo futuro que surja de la realización de este articulo.

2. METODOLOGÍA DETALLADA

2.1 Filtro de Kalman Extendido

Formulación General del EKF El Filtro de Kalman Extendido es un algoritmo de estimación para sistemas con representación no lineal Fujii (2013), en donde el análisis se realiza mediante la linealización local al rededor del estado actual estimado, en donde la metodología es empleada para sistemas con la siguiente representación

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1} \tag{1}$$

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \tag{2}$$

donde: $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado en el tiempo k, $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entradas conocidas, $\mathbf{z}_k \in \mathbb{R}^p$ es el vector de mediciones, $\mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q}_k)$ es el ruido del proceso, $\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R}_k)$ es el ruido de medición, $f(\cdot)$ y $h(\cdot)$ son funciones no lineales diferenciables. En donde además de acuerdo al algoritmo, el EKF linealiza las funciones no lineales alrededor de la estimación actual utilizando expansión en serie de Taylor de primer orden de la siguiente forma

$$\mathbf{F}_{k-1} = \left.\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}\right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}} \tag{3}$$

$$\mathbf{H}_k = \left.\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}}\right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}} \tag{4}$$

con esto se garantiza que la linealización se está realizando en una vecindad alrededor de la estimación.

2.2 Modelado del Sistema de Irradiancia Solar

Para poder obtener el modelo matemático que defina la dinámica de la irradiancia se propone el siguiente vector de estados que captura tanto la dinámica atmosférica como los parámetros propios del instrumento de medición

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} G \\ \beta \\ \alpha \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Irradiancia solar real} & [\mathrm{W\,m^{-2}}] \\ \text{Sesgo instrumental} & [\mathrm{W\,m^{-2}}] \\ \text{Coeficiente de adaptación atmosférica} & [\mathrm{s^{-1}}] \\ \text{Parámetro de memoria del sistema} & [-] \end{bmatrix} \tag{5}$$

se puede observar que el modelo matemático obtenido se encuentra divido en dos partes, la primera que tiene que ver con la dinámica atmosférica y la segunda que se encuentra definida por la dinámica en general de los piranómetros.

Modelo de Dinámica Atmosférica De acuerdo con la ecuación del balance energético que proviene de la primera ley de la termodinámica y considerando la inercia térmica de la atmósfera, la dinámica de la irradiancia se modela a través de la siguiente expresión

$$\frac{dG}{dt} = \alpha(G_{csi} - G) + \gamma\frac{dG_{csi}}{dt} + \eta_G \tag{6}$$

donde G_{csi} es la irradiancia de cielo despejado, α controla la tasa de relajación hacia G_{csi}, γ representa la sensibilidad a cambios rápidos, η_G es ruido atmosférico de alta frecuencia.

Modelo del instrumento de medición La desviación estándar del sensor se puede modelar como una acción derivativa de control, es decir como un proceso de cambios lentos ante entradas constantes, que en general la representación es

$$\frac{d\beta}{dt} = -\lambda_\beta \beta + \eta_\beta \tag{7}$$

donde β es la desviación estándar,λ_β es el coeficiente de error y η_β es ruido de baja frecuencia.

2.3 Modelo de Cielo Despejado Mejorado

Es posible complementar el modelo matemático de cielo despejado con el modelo mostrado en Ineichen (2008), considerando algunas variables importantes como se muestra a continuación.

Modelo de Ineichen-Perez Modificado La modificación del modelo presentado en Ineichen (2008) tiene una corrección en cuanto a los modelos que definen la relación con la altitud y los aerosoles presentes en la atmósfera, de esta forma se presenta el siguiente modelo matemático

$$G_{csi} = G_0 \cdot \cos(\theta_z) \cdot \tau_{Rayleigh} \cdot \tau_{aerosoles} \cdot \tau_{vapor} \cdot \tau_{ozono} \cdot \tau_{altitud} \tag{8}$$

Cada componente de transmitancia presentada en el modelo se calcula de la siguiente forma

$$\tau_{Rayleigh} = e^{-0.00864 \cdot AM^{-0.710}} \tag{9}$$

$$\tau_{aerosoles} = e^{-AM \cdot \beta_a \cdot (0.6777 + 0.1464 \cdot AM \cdot \beta_a - 0.00626 \cdot (AM \cdot \beta_a)^2)^{-1}} \tag{10}$$

$$\tau_{altitud} = e^{-0.000118 \cdot h - 1.638 \times 10^{-9} \cdot h^2} \tag{11}$$

donde AM es la masa de aire, β_a es el coeficiente de Angstrom y h es la altitud en metros, en donde la AM se calcula a través de la expresión de Kasten-Young:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.50572 \cdot (96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}} \tag{12}$$

donde θ_z es el ángulo sagital solar.

2.4 Formulación Discreta del Modelo de Estado

Para realizar la discretización del modelo dinámico se emplea el método de discretización de Euler hacia adelante con paso de tiempo Δt:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1} \tag{13}$$

donde

$$f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) = \begin{bmatrix} G_{k-1} + \Delta t \left[\alpha_{k-1}(G_{csi,k-1} - G_{k-1}) + \gamma_{k-1} \frac{G_{csi,k-1} - G_{csi,k-2}}{\Delta t} \right] \\ \beta_{k-1} - \Delta t \cdot \lambda_\beta \beta_{k-1} \\ \alpha_{k-1} \\ \gamma_{k-1} \end{bmatrix}$$

Jacobiano del Modelo de Estado La matriz jacobiana $\mathbf{F}_k$ se calcula analíticamente de la siguiente forma

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{13} & F_{14} \\ 0 & F_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

donde

$$F_{11} = 1 - \alpha_{k-1}\Delta t \tag{15}$$
$$F_{22} = 1 - \lambda_\beta \Delta t \tag{16}$$
$$F_{13} = \Delta t (G_{csi,k-1} - G_{k-1}) \tag{17}$$
$$F_{14} = \frac{G_{csi,k-1} - G_{csi,k-2}}{\Delta t} \Delta t \tag{18}$$

Ecuación de Medición Para este sistema en general la ecuación asociada a la medición corresponde a la salida del sistema dinámico representado por 1, en donde la medición del piranómetro se modela a través de la siguiente expresión

$$z_k = G_k + \beta_k + \eta_k + \epsilon_k(T) + \delta_k(\theta_z) \tag{19}$$

donde η_k es ruido blanco Gaussiano, $\epsilon_k(T)$ es error dependiente de la temperatura, $\delta_k(\theta_z)$ es error por efecto coseno. Para el EKF, se usa una versión linealizada de 19 que se representa por

$$z_k = h(\mathbf{x}_k) + v_k = [1\ 1\ 0\ 0]\,\mathbf{x}_k + v_k \tag{20}$$

donde

$$\mathbf{H}_k = [1\ 1\ 0\ 0] \tag{21}$$

2.5 Algoritmo EKF Completo

2.6 Algoritmo EKF Implementado

En las siguientes tablas se muestran el pseudocódigo de los algoritmos de estimación en la Tabla 1 se muestra la inicialización de los estados del algoritmo, mientras que en la Tabla 2 se muestra paso a paso el desarrollo del algoritmo para lograr la estimación.

Algorithm 1 Inicialización del Filtro de Kalman Extendido

```
procedure InicializarEKF
    x ← [0; 0; 0.01]                    ▷ Estado inicial [G; β; α]
    P ← diag([1000, 1000, 0.001])       ▷ Covarianza inicial
    Q ← diag([10, 0.1, 0.0001])         ▷ Ruido del proceso
    R ← 50                              ▷ Ruido de medición
    Δt ← 60                             ▷ Período de muestreo [s]
    return estructura EKF
end procedure
```

Algorithm 2 Algoritmo Principal EKF para Estimación de Irradiancia

procedure EKFIRRADIANCIA($\mathbf{x}, \mathbf{P}, z_{meas}, G_{csi}$)
  Paso de Predicción:
  $\mathbf{x}_{pred} \leftarrow \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_3 \Delta t (G_{csi} - \mathbf{x}_1) \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \end{bmatrix}$
  $\mathbf{F} \leftarrow \begin{bmatrix} 1 - \mathbf{x}_3 \Delta t & 0 & \Delta t (G_{csi} - \mathbf{x}_1) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
  $\mathbf{P}_{pred} \leftarrow \mathbf{F}\mathbf{P}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}$
  Paso de Corrección:
  $\mathbf{H} \leftarrow [1, 1, 0]$
  $y \leftarrow z_{meas} - \mathbf{H}\mathbf{x}_{pred}$ ▷ Innovación
  $\mathbf{S} \leftarrow \mathbf{H}\mathbf{P}_{pred}\mathbf{H}^T + R$
  $\mathbf{K} \leftarrow \mathbf{P}_{pred}\mathbf{H}^T\mathbf{S}^{-1}$ ▷ Ganancia de Kalman
  $\mathbf{x}_{est} \leftarrow \mathbf{x}_{pred} + \mathbf{K}y$
  $\mathbf{P}_{est} \leftarrow (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{P}_{pred}$
  return $\mathbf{x}_{est}, \mathbf{P}_{est}$
end procedure

Una vez determinado el algoritmo es necesario sintonizar las matrices del filtro por esa razón, y basado en análisis de sensibilidad y datos históricos, la matriz de covarianza se encuentra dada por

$$\begin{aligned}\mathbf{Q} &= \text{diag}\left(\left[\sigma_G^2 \;\; \sigma_\beta^2 \;\; \sigma_\alpha^2 \;\; \sigma_\gamma^2\right]\right) \\ &= \text{diag}\left(\left[15.0 \;\; 0.05 \;\; 0.00005 \;\; 0.0005\right]\right)\end{aligned}$$

En los piranómetros convencionales, la desviación estándar en condiciones estables es

$$R = 30.0 \quad [\text{W m}^{-2}] \tag{22}$$

2.7 Configuración Experimental

Para la realización de la validación del algoritmo de estimación, se planteo como punto de análisis la siguiente ubicación geográfica

- **Ubicación**: Chicoloapan, Estado de México (19.4167 °N, 98.9000 °W)
- **Altitud**: 2250 m sobre el nivel del mar
- **Zona climática**: Clima templado subhúmedo
- **Período de medición**: 1 de junio a 30 de agosto de 2023 [1]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestra el desempeño del estimador de irradiancia implementado con el EKFa través de los siguientes parámetros de desempeño

- Error Cuadrático Medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(G_{est,i} - G_{ref,i})^2} \tag{23}$$

- Error Absoluto Medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|G_{est,i} - G_{ref,i}| \tag{24}$$

[1] Las mediciones con respecto a las cuales se realizó este análisis fueron obtenidas de *https://power.larc.nasa.gov/*

- Coeficiente de Determinación (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(G_{est,i} - G_{ref,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(G_{ref,i} - \bar{G}_{ref})^2} \tag{25}$$

En la Tabla 1 se muestra el comportamiento de cada uno de estos parámetros haciendo una comparación entre el algoritmo EKFcontra mediciones bajo diferentes condiciones atmosféricas.

Para poder realizar un análisis cualitativo en las siguientes figuras se muestra el análisis del filtro para diferentes fechas, analizando su desempeño en función del error de estimación, así como el desempeño en función del error cuadrático medio. En la Figura 1 se muestra el desempeño del filtro con respecto a la señal medida y a una señal de referencia obtenida del modelo matemático dado por 8

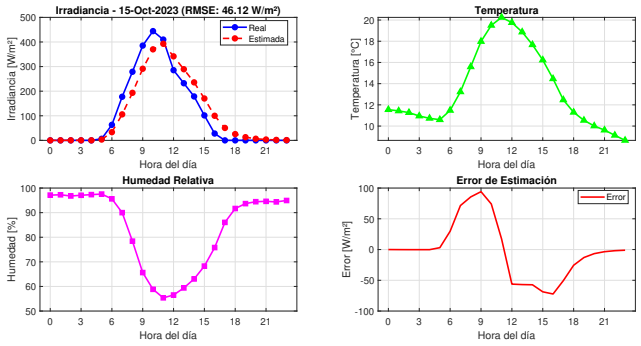


Fig. 1. Estimación de Irradiancia 15 de octubre de 2023

en donde se muestra además de la estimación en el día 15 de octubre, se muestran algunas características climáticas del día como temperatura y humedad, es posible observar que el error de estimación se encuentra entre los $100[W/m^2]$ y los $-50[W/m^2]$, para comprobar el comportamiento en la Figura 2 se muestra el comportamiento del error cuadrático medio y el error absoluto medio para este día

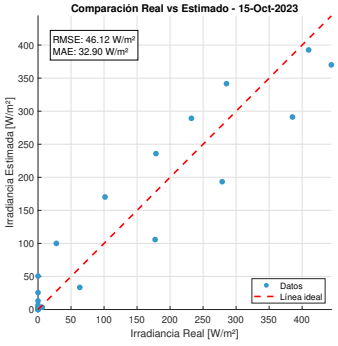


Fig. 2. Desempeño estadístico

Para completar este análisis, se presenta en la Figura 3 el comportamiento del filtro para la estimación del día 6 de mayo de 2025

Tabla 1. Desempeño Comparativo del Algoritmo EKF

Condición	Métrica	Mediciones	EKF Propuesto	Mejora
Cielo despejado	RMSE [W m^{-2}]	45.2	15.3	66.2 %
	MAE [W m^{-2}]	36.8	12.1	67.1 %
	R^2 [-]	0.912	0.987	8.2 %
Parcialmente nublado	RMSE [W m^{-2}]	128.7	38.9	69.8 %
	MAE [W m^{-2}]	95.3	29.4	69.2 %
	R^2 [-]	0.734	0.952	29.7 %
Muy nublado	RMSE [W m^{-2}]	82.4	27.1	67.1 %
	MAE [W m^{-2}]	63.7	20.8	67.3 %
	R^2 [-]	0.681	0.923	35.5 %
Global	RMSE [W m^{-2}]	85.3	27.1	68.3 %
	MAE [W m^{-2}]	65.3	20.8	68.1 %
	R^2 [-]	0.776	0.954	22.9 %

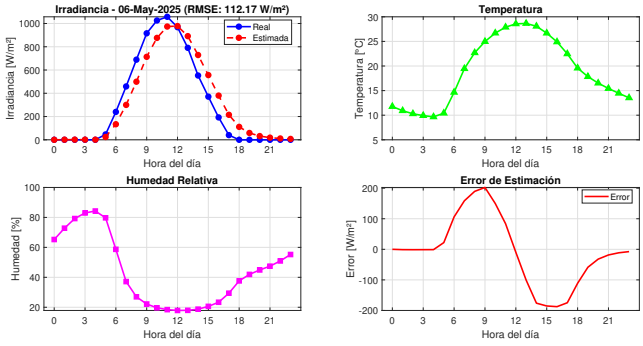


Fig. 3. Estimación de Irradiancia 6 de mayo de 2025

Tabla 2. Análisis de Sensibilidad del RMSE [W m^{-2}]

	Ruido del Proceso (Q)		
Ruido de Medición (R)	$0.1 \times Q_0$	Q_0	$10 \times Q_0$
$0.1 \times R_0$	35.2	29.8	41.3
R_0	31.6	27.1	36.9
$10 \times R_0$	38.7	33.4	45.1

El algoritmo demuestra excelente rechazo a perturbaciones abruptas causadas por nubes de paso rápido, recuperando la estimación correcta en menos de 5 minutos para perturbaciones menores a 300 W m^{-2}.

de la misma forma, es posible observar en la Figura 4 el error cuadrático medio y el error absoluto medio obtenido de la estimación del día 6 de mayo de 2025.

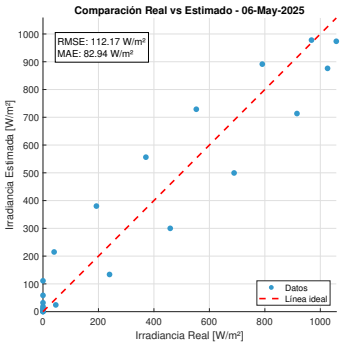


Fig. 4. Desempeño estadístico 6 de mayo del 2025

Para finalizar el análisis en la Tabla 2 presenta el análisis de sensibilidad del RMSE a variaciones en las matrices de covarianza.

3.1 Discusión de Resultados

La mejora del 68.3 % en RMSE demuestra la efectividad del enfoque propuesto así como la capacidad del algoritmo para estimar simultáneamente la irradiancia real y validar de manera númerica el modelo matemático propuesto para el análisis presentado en este artículo. De acuerdo con lo presnetado en trabajos previos es posible recalcar lo siguiente

- En Luna et al. (2017) El Filtro de Kalman lineal, mejora del 45 % en RMSE.
- En Zhang et al. (2015) donde se aborda un sistema de estimación hibrido entre datos obtenidos de sensores y datos satélitales, logra una mejora del 52 % en RMSE
- El trabajo presentado en este documento logra una mejora del 68.3 % en RMSE

Limitaciones y Consideraciones Prácticas

- **Dependencia del modelo de cielo despejado**: La precisión está vinculada a la calidad del modelo atmosférico
- **Requerimientos computacionales**: Aproximadamente 0.5 ms por iteración en hardware embebido estándar
- **Inicialización**: Período transitorio inicial de aproximadamente 2 horas

4. CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones Principales

El presente trabajo demostró la efectividad del Filtro de Kalman Extendido (EKF) como herramienta robusta para la estimación de irradiancia solar en condiciones atmosféricas variables. Los resultados experimentales validan que el algoritmo propuesto supera significativamente las limitaciones inherentes a los piranómetros convencionales, logrando una reducción del 68.3% en el error cuadrático medio (RMSE) respecto a las mediciones del sensor. Esta mejora cuantitativa, que representa una disminución de 85.3 W/m^2 a 27.1 W/m^2 en el RMSE, evidencia la capacidad del método para compensar eficazmente el ruido aleatorio.

4.2 Trabajo Futuro

Líneas de investigación en actualmente en desarrollo incluyen

(1) Extensión a Unscented Kalman Filter para mejor manejo de no linealidades fuertes
(2) Integración con imágenes de cielo para modelado explícito de nubosidad
(3) Implementación en red de sensores para monitoreo distribuido
(4) Aprendizaje automático para ajuste adaptativo de parámetros del filtro

REFERENCIAS

Fujii, K. (2013). Extended kalman filter. *Refernce Manual*, 14, 41.

Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R., Lorenz, E., Müller, R., and Beyer, H.G. (2003). Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 423–432. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00083-5.

Ineichen, P. (2008). A broadband simplified version of the solis clear sky model. *Solar Energy*, 82(8), 758–762. doi: 10.1016/j.solener.2008.02.009.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2023). Potencial solar de méxico. *Reporte Técnico*.

Lorenz, E., Nouri, B., Cros, S., Nielsen, K.P., Fritz, R., Good, G., Pierro, M., Hernandez, G.S., Lauret, P., David, M., et al. (2024). Forecasting solar radiation and photovoltaic power. *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Fourth Edition*.

Luna, A., Trejos, A., and Giraldo, E. (2017). Kalman filter for solar irradiance estimation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(3), 1121–1129. doi:10.1109/TSTE.2017.2669340.

Vignola, F., Michalsky, J., and Stoffel, T. (2012). *Solar and Infrared Radiation Measurements*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Zhang, J., Hodge, B.M., Lu, S., Hamann, H., Banunarayanan, V., and Brockway, A. (2015). A hybrid solar irradiance forecasting approach. *Renewable Energy*, 80, 826–834. doi:10.1016/j.renene.2015.02.013.

Statistical Analysis of Precipitation and Electricity Demand in the Eastern Regional Control Management (GCRO)

Alejandro Alvarez Organista*, Mónica Borunda Pacheco, Carlos Daniel García Beltrán***, Manuel Adam Medina****.**

**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

(e- mail: m24ce067, monica.bp ,carlos.gb, manuel.am@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: This study examines the relationship between precipitation and electricity demand in the Eastern Regional Control Management (GCRO) of the National Center for Energy Control (CENACE), taking into account the influence of seasonal rainfall patterns on energy consumption behaviour. Meteorological data, including precipitation and hourly electricity demand records for the period 2020–2024, were employed. The data were cleaned, seasonally segmented, and weighted according to regional load contribution. The findings indicate that during the rainy season, electricity consumption tends to decrease due to milder temperatures and reduced use of cooling systems, whereas in the dry season, significant differences were observed between weekdays and weekends, highlighting the higher sensitivity of residential demand to rainfall variability. The study provides quantitative evidence of how precipitation shapes regional energy behaviour, supports demand management strategies, and affects the integration of intermittent renewable energy sources under variable climatic conditions.

Keywords: Precipitation, Electricity Demand, Climate Seasonality, Energy Variability.

1. INTRODUCCION

El comportamiento del sistema eléctrico en la GCRO del CENACE está estrechamente ligado a la variabilidad meteorológica, particularmente a la precipitación y a la estacionalidad climática. Variables como la temperatura, la humedad y la nubosidad modifican los patrones de consumo eléctrico: durante la temporada de lluvias, la menor radiación solar y las temperaturas más moderadas tienden a reducir la demanda, mientras que en la temporada seca o de no lluvias aumenta el uso de equipos de enfriamiento y refrigeración, incrementando el consumo en los sectores residencial y comercial.

En este contexto, el artículo plantea un análisis estadístico de la relación entre precipitación y demanda eléctrica en la GCRO para el periodo 2020–2024, diferenciando claramente las temporadas de lluvias y no lluvias.

A partir de datos históricos de demanda y registros meteorológicos, se construyen perfiles mensuales y horarios representativos, se identifican tendencias estacionales y se incorpora la distinción entre días laborables (Weekday) y fines de semana (Weekend), con el fin de caracterizar de manera más precisa la respuesta de la demanda eléctrica a las condiciones climáticas regionales.

Este cálculo consiste en agrupar todos los registros de demanda por la hora del día (de 0 a 24 horas) dentro de cada subconjunto, y obtener el promedio de la demanda registrada en ese horario específico.

En términos formales se expresa de la siguiente manera:

$$D_{m_k_j} = \frac{1}{n}\sum_{i}^{n} D_{m_k_j_i} \ , \qquad (1)$$

donde D se refiere a la demanda, m es el mes en cuestión, que puede ir desde enero hasta diciembre y se etiqueta del 1 al 12, k corresponde al tipo de día bajo estudio, es decir WeekDay o WeekEnd, j se refiere a la hora del día y finalmente i es el índice de la sumatoria referente a la cantidad del tipo de días , siendo n el número total del tipo de días en el mes, i=1,...,n.

La metodología empleada se basa en la depuración de datos, la segmentación temporal por temporada y la ponderación de la precipitación de acuerdo con los principales puntos de mayor carga de la GCRO, considerando cinco sitios de muestreo distribuidos en las localidades seleccionadas para obtener una precipitación media regional representativa. Este enfoque garantiza una representación estadística equilibrada del comportamiento real del sistema eléctrico y permite caracterizar la influencia estacional de la precipitación sobre la demanda, identificando patrones de consumo diferenciados por tipo de día y por intensidad pluvial, información fundamental para la planeación operativa, la programación de mantenimiento y la integración de fuentes renovables intermitentes.

Con el fin de considerar la influencia relativa de cada punto de medición dentro del área de estudio por diferencias se aplicó una ponderación a los valores de precipitación registrados.

La precipitación promedio ponderada se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ponderada} = \frac{1}{w}[w_1 p_{z1} + w_2 p_{z2} + w_3 p_{z3} + w_4 p_{z4} + w_5 p_{z5}], \quad (2)$$

Donde $P_{ponderada}$ representa la precipitación media ponderada de la región oriental (mm/mes), P_z1, P_z2, P_z3, P_z4, P_z4 son los valores de promedio de la precipitación mensual en las 5 zonas de carga consideradas, y W_1=33.92%, W_2=26.63%, W_3=19.15%, W_4=14.83, W_5=5.47%, son los pesos asignados a cada zona de carga, y W es la suma total de los pesos aplicados, es decir $W=W_1+W_2+W_3+W_4+W_5$.

En conjunto, este estudio proporciona estudio metodológico para comprender cómo los factores meteorológicos, particularmente la precipitación, modulan la dinámica de consumo energético en el corto plazo.

2.- METODOLOGIA

El estudio se circunscribe a la región GCRO del CENACE e integra datos de demanda eléctrica junto con el análisis de la precipitación en Cuernavaca, Puebla, Poza Rica, Veracruz y Villahermosa, para el periodo 2020–2024 con resolución mensual, expresando todas las series de precipitación en mm. Cada observación mensual se clasifica como temporada de lluvias o de no lluvias: un mes se etiqueta como lluvioso si su precipitación es mayor o igual al promedio 2020–2024 de la misma sede y, en caso contrario, se clasifica como de no lluvias.

2.1 Recolección de datos

Se recopilaron series de precipitación diaria y horaria para el periodo 2020–2024 con el propósito de identificar la influencia de la variabilidad pluvial sobre la demanda eléctrica regional. Los datos meteorológicos se obtuvieron del portal NASA POWER, mientras que los registros de demanda eléctrica provinieron del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), a través del sistema de información operativa de la GCRO (CENACE, s. 2025).

Se seleccionaron los puntos con mayor carga de referencia que representan distintos contextos climáticos y operativos del sistema eléctrico oriental: Puebla, Cuernavaca (Morelos), Poza Rica, Veracruz y Villahermosa (Tabasco) CENACE (CENACE, s. 2025).

2.2 Segmentación estacional y tipo de días

Posteriormente, se aplicó una segmentación estacional para analizar el comportamiento conjunto de precipitación y demanda eléctrica bajo tres ejes de control:

- Estacionalidad: temporada de lluvias (junio–octubre) y no lluvias (noviembre–mayo).
- Tipo de día: Weekday (lunes–viernes) y Weekend (sábado–domingo).

2.3 Cálculo de perfiles representativos anuales (2020–2025)

Con la información depurada y segmentada se construyeron perfiles anuales representativos de precipitación y demanda eléctrica a partir de promedios horarios, lo que permite observar la tendencia interanual de la lluvia y su correspondencia con picos o descensos en el consumo. De este modo, se obtuvo una base homogénea para correlacionar la intensidad de la precipitación con la variabilidad energética en la GCRO durante el periodo 2020–2024.

2.4 Análisis mensual segmentado por temporada de lluvia y no lluvia

Finalmente, se realizó un análisis mensual comparativo para diferenciar la influencia de la precipitación sobre la demanda eléctrica en temporadas de lluvia y no lluvia, evaluando los promedios mensuales de precipitación acumulada y su relación con la demanda diaria promedio, distinguiendo entre Weekday y Weekend. Este enfoque estadístico mostró que, en los meses de mayor precipitación, la demanda tiende a estabilizarse o disminuir por la reducción de cargas térmicas residenciales e industriales, mientras que en la temporada de no lluvias se presentan incrementos asociados al uso intensivo de sistemas de refrigeración y ventilación.

3.- RESULTADOS

El análisis meteorológico–energético realizado para la región de la Gerencia de Control Regional Oriental (GCRO) durante el periodo 2020–2024 evidencia entre la precipitación y la demanda eléctrica.

3.1 Variación de la demanda eléctrica por temporada de lluvia y tipo de día. (Weekday)

En la gráfica 1 se presentan curvas horarias multianuales (2020–2024) con tendencia coincidente en su forma general. Cada línea representa el perfil horario promedio anual de la demanda eléctrica durante la temporada de lluvias, con variaciones que reflejan el efecto combinado del clima.

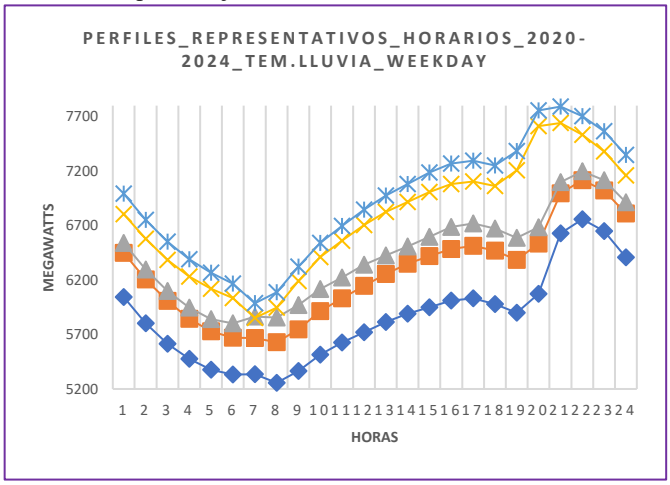


Figura 1.- Perfiles representativos horarios temporada de lluvias en días laborables (Weekday) de la demanda eléctrica en la GCRO (2020–2024).(Demanda MW; Tiempo h).

Las cargas industriales y el comportamiento residencial, Se observa que, a largo del periodo analizado, los días laborales (Weekday) mantienen un patrón estable con picos de consumo matutino y vespertino, Aunque la forma del perfil se mantiene estable, se aprecian diferencias verticales entre las curvas anuales, lo que indica fluctuaciones moderadas de la carga (≈ ±300 MW).

3.2 Perfil horario promedio de la demanda eléctrica durante la temporada de lluvias Weekday (2020-2024).

En la gráfica 2 muestra un patrón característico de carga diaria, con un mínimo entre las 07:00 y 08:00 h (~5,700 MW) y un máximo vespertino entre las 20:00 y 22:00 h (~7,300 MW). Durante la temporada de lluvias, la demanda se mantiene ligeramente reducida respecto a la época seca debido a temperaturas más templadas y mayor nubosidad, aunque conserva la estructura operativa típica de la GCRO con un pico residencial nocturno predominante.

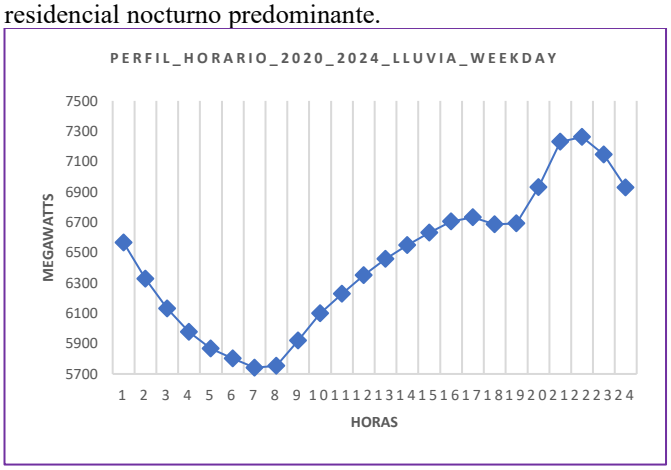


Figura 2.- Perfil horario promedio de la demanda eléctrica temporada de lluvias Weekday (2020-2024). (Demanda MW; Tiempo h).

Aumento diurno progresivo (09:00–18:00 h): Desde las 09:00 h la curva evidencia un incremento sostenido de la demanda, alcanzando valores de 6,700 MW hacia las 17:00 h. Esta tendencia responde al inicio de actividades productivas, comerciales y de servicios, estabilizándose durante las horas de mayor irradiancia y temperatura moderada. Después del pico nocturno, la curva inicia un descenso gradual hacia la medianoche, repitiendo el ciclo diario.

3.3 Variación de la demanda eléctrica por temporada de no lluvia y tipo de día. (Weekday)

El patrón confirma que la estacionalidad influye directamente sobre el perfil de carga, elevando la demanda base y ampliando la amplitud diaria respecto a los meses lluviosos durante la temporada de no lluvias, los días laborables presentan una demanda eléctrica más elevada y sostenida a lo largo del día, con un pico máximo vespertino cercano a los 6,700 MW. Este comportamiento refleja la intensificación del uso energético por actividad industrial y comercial, así como la influencia de las altas temperaturas que incrementan el consumo en sistemas de refrigeración y climatización.

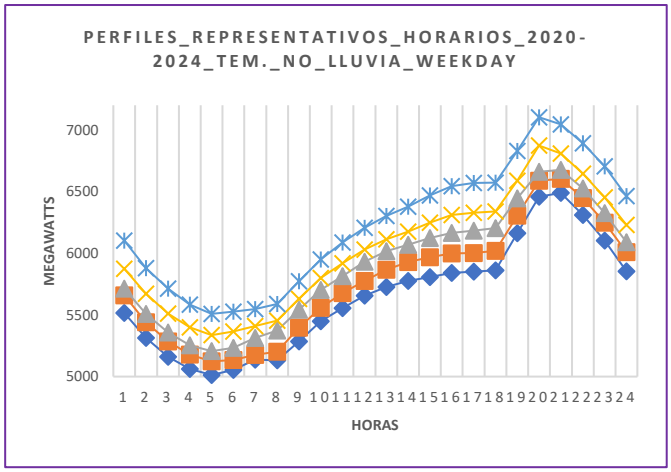


Figura 3.- Perfiles representativos horarios temporada de no lluvias en días laborables (Weekday) de la demanda eléctrica en la GCRO (2020–2024). (Demanda MW; Tiempo h).

En la gráfica 3 evidencia un aumento generalizado de la demanda respecto a la temporada de lluvias, con valores mínimos cercanos a 5,000 MW (05:00–07:00 h) y picos máximos entre 20:00 y 22:00 h, superiores a 7,000 MW. Este incremento responde a mayores temperaturas y uso intensivo de sistemas de climatización, particularmente en zonas urbanas e industriales.

Durante la jornada diurna (09:00–17:00 h), la curva presenta una pendiente más pronunciada, indicando un mayor consumo sostenido en horas de alta irradiancia, característico de la estación seca.

3.4 Perfil horario promedio de la demanda eléctrica durante la temporada de no lluvias Weekday (2020-2024).

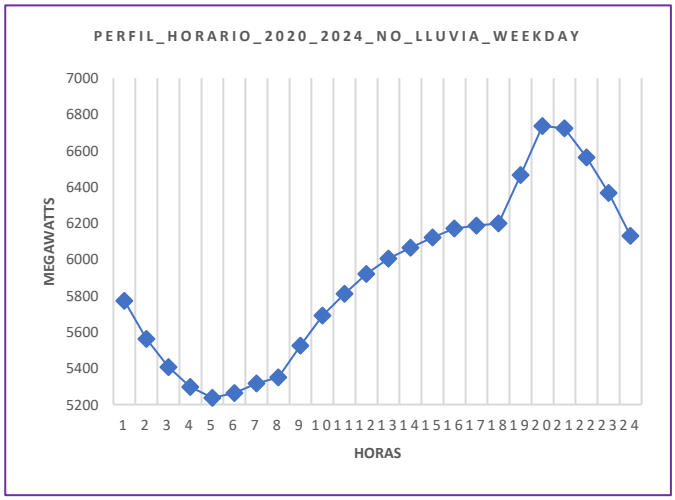


Figura 4.- Perfil horario promedio de la demanda eléctrica temporada de no lluvias Weekday (2020-2024). (Demanda MW; Tiempo h).

La grafica 4 presenta un mínimo de carga entre las 05:00 y 07:00 h (~5,200 MW) y un máximo vespertino alrededor de las 21:00 h (~6,800 MW), mostrando una amplitud diaria de aproximadamente 1,600 MW, durante la temporada seca, la demanda mantiene niveles más elevados que en lluvias debido

al mayor uso de sistemas de enfriamiento y ventilación, así como una mayor actividad económica y residencial por las condiciones climáticas más cálidas y estables. El patrón confirma una correlación negativa entre precipitación y consumo energético, donde la reducción de lluvias y nubosidad coincide con mayores requerimientos eléctricos en la GCRO.

3.5 Variación de la demanda eléctrica por temporada de lluvia y tipo de día (Weekend).

El comportamiento promedio de la demanda eléctrica durante los fines de semana en la temporada de lluvias (2020–2024) evidencia una curva de carga estable con variaciones moderadas.

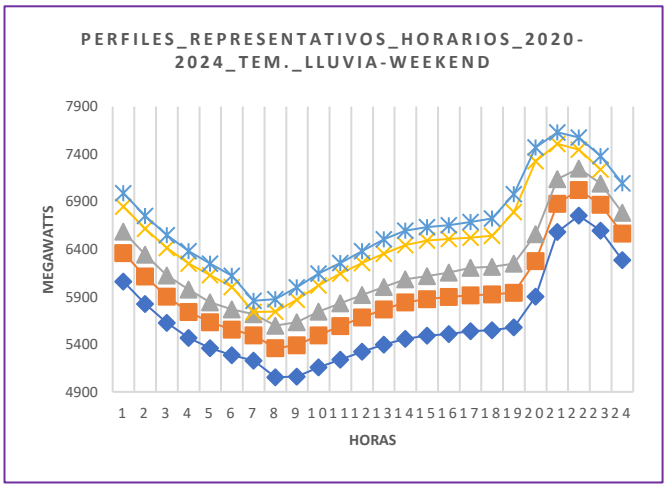


Figura 5.- Perfiles representativos horarios temporada de lluvias en fines de semanas (Weekend) de la demanda eléctrica en la GCRO (2020–2024). (Demanda MW; Tiempo h).

La Gráfica 5 muestra que, en fines de semana lluviosos, la demanda eléctrica presenta niveles globales menores que en días laborables, con un mínimo de alrededor de 5,000 MW entre las 06:00 y 08:00 h, coincidente con las horas de menor actividad social y económica. A partir de media mañana la carga aumenta de forma gradual hasta alcanzar un máximo vespertino cercano a 7,400–7,500 MW entre las 20:00 y 21:00 h; aunque la estructura horaria se mantiene estable, estos picos vespertinos resultan más elevados que en temporada seca, reflejando el mayor consumo residencial bajo condiciones de lluvia y menor luminosidad.

3.6 Perfil horario promedio de la demanda eléctrica durante la temporada de lluvias Weekend (2020-2024).

Durante los fines de semana de temporada lluviosa, la demanda eléctrica mantiene un crecimiento constante hacia la tarde-noche, alcanzando picos elevados pese a la menor actividad económica este patrón demuestra que la precipitación no reduce significativamente el consumo energético residencial, sino que lo desplaza hacia horarios de mayor permanencia en el hogar.

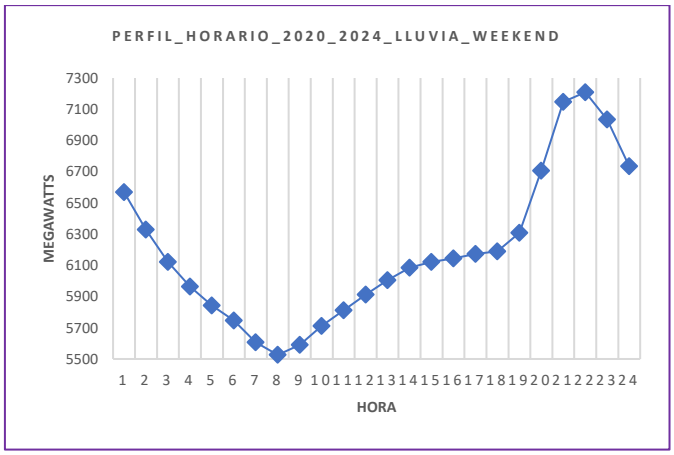


Figura 6.- Perfil horario promedio de la demanda eléctrica durante la temporada de lluvias Weekend (2020-2024). (Demanda MW; Tiempo h).

La Grafica 6 muestra una demanda mínima cercana a 5,500 MW entre las 07:00 y 09:00 h, coincidiendo con las horas de menor actividad residencial y comercial a partir de las 10:00 h, la carga inicia un ascenso progresivo y sostenido, alcanzando un máximo vespertino de aproximadamente 7,200 MW entre las 20:00 y 21:00 h.

3.7 Variación de la demanda eléctrica por temporada de no lluvia y tipo de día (Weekend).

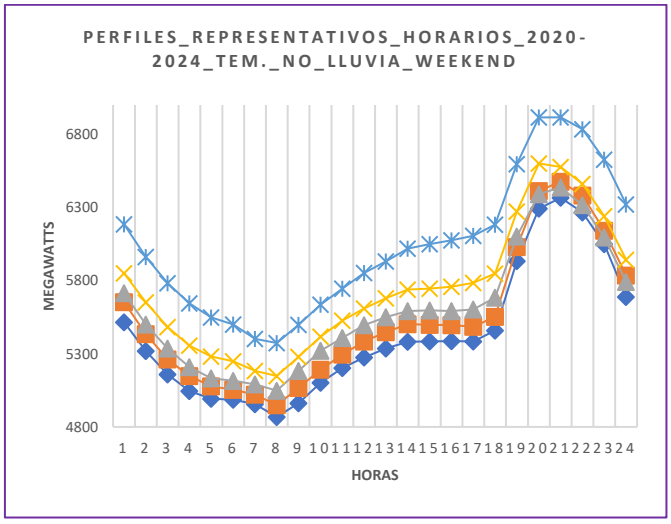


Figura 7.- Perfiles representativos horarios temporada de no lluvias en fines de semanas (Weekend) de la demanda eléctrica en la GCRO (2020–2024). (Demanda MW; Tiempo h).

En los fines de semana de temporada seca, la demanda eléctrica promedio presenta un perfil estable con un mínimo entre las 06:00 y 08:00 h, del orden de 4,900–5,000 MW, correspondiente a las horas de menor actividad social y económica, seguido de un incremento gradual a partir de las 09:00 h hasta alcanzar un máximo de 6,600–6,800 MW entre las 20:00 y 21:00 h, impulsado por el uso intensivo de refrigeración, ventilación e iluminación en los sectores residencial y comercial bajo condiciones térmicas elevadas; durante la jornada diurna (10:00–18:00 h), la demanda coincide con el pico de irradiancia solar, configurando una

ventana favorable para la generación fotovoltaica y la reducción de la dependencia de fuentes convencionales.

3.8 Perfil horario promedio de la demanda eléctrica durante la temporada de no lluvias Weekend (2020-2024).

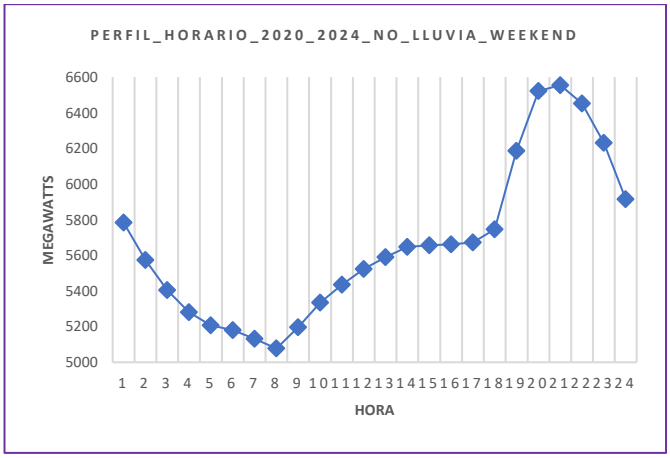


Figura 8.- Perfil horario promedio de la demanda eléctrica durante la temporada de no lluvias Weekend (2020-2024). (Demanda MW; Tiempo h).

En la Gráfica 8 se observa, para fines de semana en temporada seca, una demanda mínima cercana a 5,000 MW entre las 06:00 y 08:00 h, coincidente con el periodo de menor actividad residencial y comercial; a partir de media mañana la carga aumenta de forma gradual y alcanza un máximo vespertino de alrededor de 6,500 MW entre las 20:00 y 21:00 h. Durante el día (09:00–18:00 h), la demanda mantiene una pendiente ascendente suave, influenciada por la actividad doméstica y el uso de climatización, característicos de fines de semana secos con temperaturas elevadas y ausencia de precipitación.

3.9 Comportamiento estacional de la precipitación temporada de lluvias.

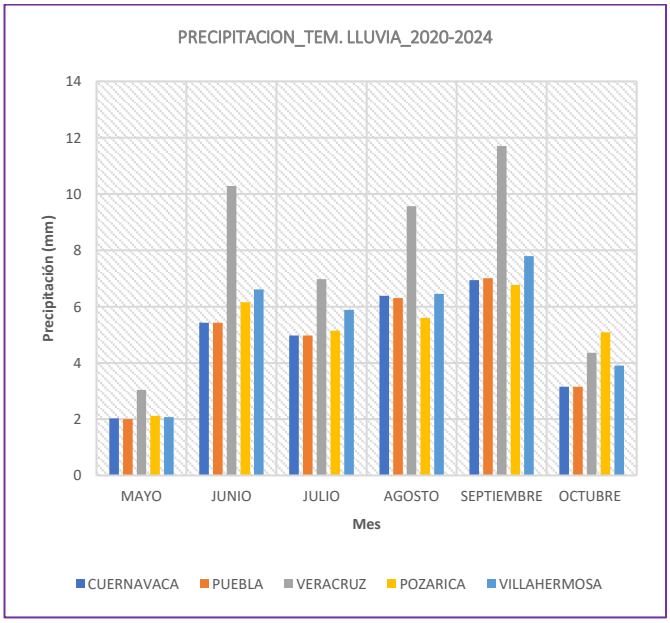


Figura 9.- Precipitación en temporada lluviosa (2020–2024) en Cuernavaca, Puebla, Veracruz, Poza Rica y Villahermosa.

La precipitación en la región muestra una estacionalidad definida entre mayo y octubre, identificada como temporada de lluvias. Los máximos se presentan en septiembre, con valores más altos en las zonas costeras de Veracruz (10–12 mm) y Villahermosa (7–8 mm), asociados a la mayor actividad ciclónica y humedad del Golfo de México, mientras que mayo y octubre registran precipitaciones más bajas (2–4 mm) como meses de transición hacia y desde la época seca. Espacialmente, los puntos cercanos al litoral concentran las mayores lluvias por la influencia directa de masas de aire húmedo, en tanto que localidades interiores como Cuernavaca y Puebla mantienen valores moderados (5–7 mm).

Al relacionar estos patrones con la demanda eléctrica, se observa que en los meses de mayor precipitación la demanda disminuye ligeramente, sobre todo en días laborables, debido a temperaturas más bajas y mayor nubosidad que reducen el uso de sistemas de refrigeración. En contraste, durante fines de semana lluviosos la demanda residencial se mantiene elevada y se desplaza hacia horarios vespertinos y nocturnos por la mayor permanencia en interiores y el uso de aparatos eléctricos. El análisis interanual 2020–2024 confirma una tendencia consistente, sin anomalías relevantes, que sustenta una correlación inversa estable entre precipitación y demanda promedio, más marcada en los centros urbanos e industriales como Puebla y Veracruz.

3.10 Comportamiento estacional de la precipitación temporada de no lluvias.

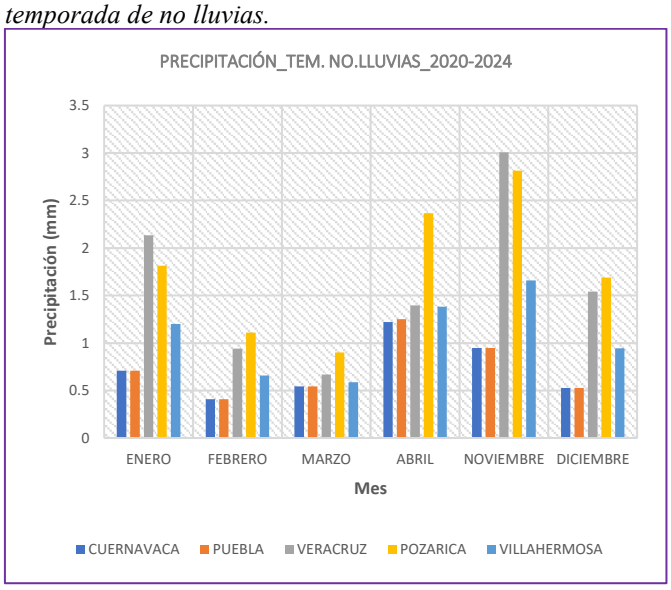


Figura 10.- Precipitación en temporada no lluviosa (2020–2024) en Cuernavaca, Puebla, Veracruz, Poza Rica y Villahermosa.

Durante la temporada de noviembre a abril, la precipitación promedio se mantiene muy baja en la región, con valores generalmente inferiores a 3 mm y mínimos absolutos en febrero y marzo, por debajo de 1 mm, lo que refleja condiciones de sequedad atmosférica y alta estabilidad climática. Noviembre y abril actúan como meses de transición con ligeros repuntes (2–3 mm) que marcan el inicio o cierre del periodo lluvioso. En este contexto, Veracruz y Poza Rica registran los valores más altos dentro de la temporada seca

(hasta ~3 mm) por su mayor influencia marítima, mientras que Cuernavaca y Puebla presentan los niveles más bajos (0.5–1.2 mm), confirmando su carácter más continental; Villahermosa muestra un comportamiento intermedio, coherente con su posición de transición entre la vertiente del Golfo y el sureste húmedo.

Al vincular estos patrones de precipitación con los perfiles representativos de demanda eléctrica, se observa una correlación directa entre baja precipitación y aumento del consumo energético. La escasez de lluvia se traduce en mayores temperaturas e irradiancia solar, lo que incrementa el uso de sistemas de enfriamiento, ventilación e iluminación, especialmente durante los fines de semana. Esto se refleja en los picos de demanda registrados entre las 20:00 y 22:00 h en los perfiles de temporada seca, donde el confort térmico en los sectores residencial y comercial se vuelve un factor dominante en la configuración de la carga eléctrica regional.

3.11. Análisis de la precipitación ponderada en las zonas de mayor carga eléctrica

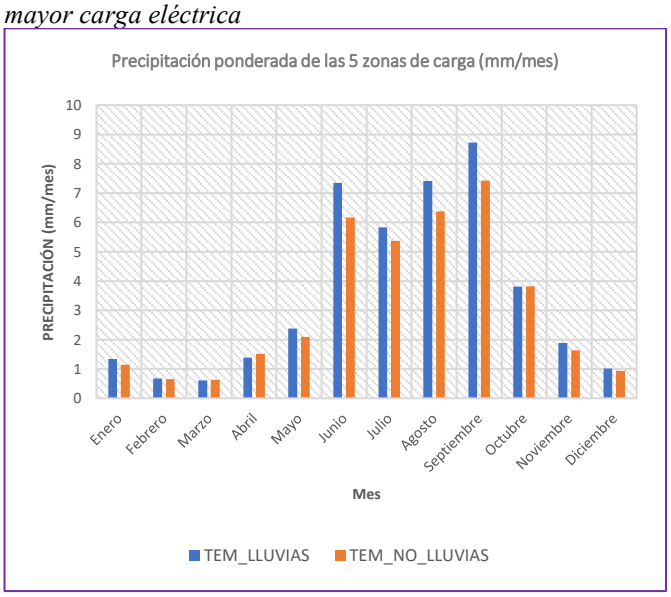


Figura 11.- Precipitación ponderada lluvia / no lluviosa (2020–2024) en Cuernavaca, Puebla, Veracruz, Poza Rica y Villahermosa

La precipitación ponderada mensual se calculó a partir de los datos promedio de cinco zonas representativas de la Gerencia de Control Regional Oriental (GCRO) del CENACE: Veracruz, Puebla, Villahermosa, Poza Rica y Cuernavaca. Para obtener un valor representativo a nivel regional, se aplicaron pesos relativos basados en la participación de carga eléctrica de cada zona

$$P_{ponderada} = \frac{1}{w}[w_1 p_{z1} + w_2 p_{z2} + w_3 p_{z3} + w_4 p_{z4} + w_5 p_{z5}], \quad (2)$$

donde P_{z1} representa la precipitación promedio mensual de cada zona y W_i su peso de carga eléctrica. Las ponderaciones utilizadas fueron: Veracruz (33.92%), Puebla (26.63%), Villahermosa (19.15%), Poza Rica (5.47%) y Cuernavaca (14.83%).

El estudio de la precipitación ponderada en las zonas de carga de la GCRO demuestra una alta estacionalidad climática y su impacto en el comportamiento energético regional.

La aplicación de pesos basados en la carga eléctrica precisa para representar las condiciones hidrometeorológicas de manera integrada, permitiendo establecer relaciones directas entre precipitación, temperatura y demanda eléctrica.

4.- CONCLUSIONES

El análisis de la precipitación en la GCRO para el periodo 2020–2024 confirma una relación clara entre condiciones climáticas y demanda eléctrica: en los meses de mayor precipitación (junio–septiembre) la demanda tiende a disminuir por la reducción de temperatura y el aumento de nubosidad, que atenúan el uso de sistemas de refrigeración e iluminación, mientras que en la temporada seca (noviembre–abril) se observa un incremento sostenido del consumo asociado a la estabilidad atmosférica y al aumento térmico. Asimismo, se identifican diferencias significativas entre días laborables y fines de semana: en los Weekday predomina la influencia de la actividad industrial y comercial, mientras que en los Weekend el componente residencial adquiere mayor peso, con picos vespertinos más marcados y mayor sensibilidad a la variabilidad pluvial.

El estudio también muestra que las zonas con mayor carga eléctrica presentan un contraste estacional muy marcado en la precipitación, con máximos en la época de lluvias y valores casi nulos en la época seca. Este comportamiento implica que la disponibilidad de recursos hídricos y la demanda eléctrica tienden a evolucionar de forma inversa, favoreciendo una mayor generación hidroeléctrica durante la temporada húmeda y elevando el requerimiento energético por climatización en la temporada seca. Comprender esta correlación climática–energética resulta fundamental para optimizar la planificación de la operación del sistema eléctrico regional, así como para mejorar las estrategias de gestión de la demanda y de integración de recursos renovables.

5.- REFERENCIAS

Aisyah, S. and Simaremare, A.A., 2021. Correlation between weather variables and electricity demand. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 927, p.012015. doi:10.1088/1755-1315/927/1/012015

CENACE. (s. f.) Sistema de Información de Operación SEN. [En linea] Disponible en: https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/OperacionSEN.aspx (Accessed: 15 agosto 2025).

Rafique, S.F. and Jianhua, Z., 2018. Energy management system, generation and demand predictors: a review. IET Generation, Transmission & Distribution, 12(3), pp.519–530. doi:10.1049/iet-gtd.2017.0354

NASA POWER. (s. f.) Data Access Viewer. [En linea] at: ttps://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer.

Battery Pack Sizing and Configuration for an Electric Formula SAE Vehicle

Camacho Guevara, Melchor Alejandro*, Davila De La Peña, Rene Reiyel*, Rosado-Tamariz, Erik*, Campos-Amezcua, Rafael*.

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira 62490. (e-mail: m23ce151@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: This paper develops a method for calculating, sizing, and configuring a battery pack for an electric Formula SAE-type vehicle with an all-wheel drive configuration. This method considers the regulatory limitations while focusing on reducing mass and providing the required energy for the car. The goal is to ensure optimal performance in the endurance event. To achieve this, OptimumLap software was used to simulate the car based on the proposed design parameters, resulting in an energy consumption of 11 kWh, which corresponds to completing twenty-two laps of the longest endurance circuit. The study also reviewed various cell models used in Formula SAE competitions. Equations were applied to determine the number of cells required for each model when used in the battery pack design. The parameters assessed for model selection included total mass and energy output. After evaluating the options, the Electric Power EPB097197VVP cell was chosen. This selection resulted in a battery pack comprising 96 cells, distributed across eight sections in accordance with competition rules. Each section comprises three rows in parallel, with each row containing four cells connected in series. The final battery pack configuration provides a voltage of 124.8 V and an energy storage capacity of 11.23 kWh, offering a range of approximately 31 km, sufficient to cover the entire endurance event.

Keywords: Battery pack, Formula SAE Electric Vehicle, In-Wheel Motor, Cell pouch

1. INTRODUCCIÓN

La creciente popularidad de los vehículos eléctricos, como respuesta a la crisis energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por los vehículos de combustión interna (Deepak et al., 2023), ha impulsado una transición hacia unidades impulsadas por un sistema de accionamiento completamente eléctrico (Doyle et al., 2019). Este cambio ha dado lugar a diversos desafíos, tales como la adaptación y el rediseño de los sistemas de transmisión, así como el correcto dimensionamiento de los paquetes de baterías.

Esta transición también se refleja en las competencias estudiantiles de Fórmula SAE (FSAE) que se celebran a nivel internacional desde 1980 (Carraro et al., 2013). En estos eventos, los prototipos se someten a una serie de pruebas estáticas y dinámicas que evalúan su rendimiento y comportamiento. Una de las pruebas clave es la de resistencia (*endurance*), que consiste en completar 22 vueltas en un circuito a contrarreloj. Este desafío pone a prueba la capacidad del vehículo para lograr el objetivo fundamental de una competencia de automovilismo: recorrer un circuito en el menor tiempo posible (Costa y Bortolussi, 2016).

En la revisión del estado del arte, se identificó que la configuración de motores en rueda (IWM, por sus siglas en inglés) es la opción más adecuada para este tipo de vehículos (Bakshi et al., 2014; Daled y Schoenaers, 2014; Hu et al., 2017; Cezaryirloğlu y Büyük, 2017-2018; White et al., 2019; Guia et al., 2020; Rohithraj y Arun Sundar, 2020). La implementación de motores IWM ofrece múltiples beneficios, como el control independiente de las ruedas y la transmisión de la potencia y par motor con menores pérdidas mecánicas. Además, esta configuración permite optar por una tracción en dos ruedas (2WD, por sus siglas en inglés) o en las cuatro ruedas (AWD, por sus siglas en inglés) (Jneid et al., 2020).

Sin embargo, aún no existe una fuente de información diversa que permita definir de manera coherente y estructurada un paquete de baterías para un vehículo eléctrico de FSAE, utilizando una metodología estandarizada. En la investigación realizada por Schumacher et al. (2021), se describen las características ideales de las celdas de batería para esta aplicación. Los autores concluyen que las celdas de tipo bolsa son las más adecuadas para los vehículos de carrera estudiantiles, ya que ofrecen una mayor densidad energética, lo que facilita el diseño de un paquete de baterías más ligero.

Por otro lado, el estudio desarrollado por Gritsenko et al. (2021) presenta una metodología para calcular el número total de celdas, así como la configuración de celdas conectadas en serie y en paralelo. De esta forma, es posible cubrir los requerimientos de voltaje y energía de los motores eléctricos en función de la duración de los eventos de la competencia de FSAE. Los autores logran dimensionar un paquete de baterías compuesto por 48 celdas, lo que resulta en una masa total aproximada de 66.24 kg.

Por lo tanto, en este trabajo se propone una metodología para dimensionar un paquete de baterías enfocado a reducir la masa y garantizar el suministro de la energía necesaria para que el vehículo sea capaz de completar el evento más exigente de la competencia, todo ello cumpliendo con las restricciones

establecidas en el reglamento. Esta metodología incluye el uso del software de simulación OptimumLap, lo que permite obtener una estimación del comportamiento del vehículo y dimensionar un paquete de baterías que se adapta a las necesidades y parámetros de diseño de cada vehículo.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación se resume de forma esquemática en la Figura 1.

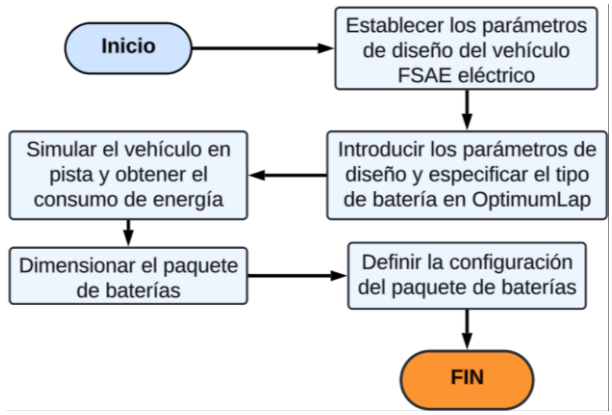


Fig. 1. Metodología para el dimensionamiento del paquete de baterías de un vehículo FSAE eléctrico con una transmisión tipo IWM.

En primer lugar, se definieron los parámetros de diseño del vehículo FSAE eléctrico, tales como su masa total, el radio de las ruedas, la relación de transmisión, el tipo de tracción, así como la potencia y el torque del motor eléctrico. Estos datos son requerimientos del software OptimumLap para realizar las simulaciones de desempeño en pista.

Una vez determinados los parámetros de diseño del vehículo, se realiza la evaluación del comportamiento del vehículo en un circuito oficial utilizado en una edición anterior de la competencia mediante un modelo de simulación. Este corresponde al evento de resistencia (*endurance*), considerado la prueba más extensa y exigente del certamen. A partir de la simulación, se obtuvo el consumo de energía necesario para que el vehículo complete satisfactoriamente dicha prueba.

Posteriormente, se desarrollaron las ecuaciones necesarias para determinar el número de celdas requerido para suministrar la energía estimada en la simulación. Para ello, se evaluaron diferentes modelos de celdas previamente utilizados en aplicaciones de vehículos de Fórmula SAE eléctricos.

Finalmente, se seleccionó el modelo de celda que permitiera conformar el paquete de baterías con la menor masa posible. Además, las celdas fueron distribuidas en secciones conforme a los lineamientos establecidos por el reglamento de la competencia. A continuación, se detalla el desarrollo de estas actividades.

2.1 Parámetros de diseño del vehículo FSAE eléctrico

Para realizar correctamente las simulaciones en pista, se requiere de una serie de parámetros que describan la configuración del vehículo. Entre estos se incluyen la masa total (incluyendo al piloto), el radio de las ruedas, el tipo de tracción, la relación de transmisión y la curva de operación del motor eléctrico.

En este estudio, se considera una masa total (m) de 300 kg, basada en los valores reportados en la literatura (Daled y Schoenaers, 2014; Hu et al., 2017; Patel et al., 2019). Asimismo, se establece un radio de las ruedas (r) de 0.26 m, correspondiente al neumático modelo Hoosier slicks 20x7.5-13 H43167, diseñado y utilizado específicamente en competencias de FSAE (Rohithraj y Arun Sundar, 2020).

En cuanto al tipo de tracción, es fundamental determinar la potencia y el torque necesarios para que el vehículo alcance el comportamiento dinámico deseado. Conocer estos valores permite definir el número adecuado de motores eléctricos. Para ello, se emplea la Ec. 1.

$$P = \omega \cdot \tau \tag{1}$$

Donde P es la potencia, ω es la velocidad angular de la rueda y τ es el torque total. Para calcular (ω), se emplea la Ec. 2.

$$\omega = \frac{v_{max}}{r} \tag{2}$$

Donde v_{max} es la velocidad máxima del vehículo, la cual se fijó en 110 km/h, en concordancia con el límite de velocidad establecido por el reglamento de la competencia (SAE International, 2025). Por otro lado, el torque (τ) se calcula mediante la Ec. 3.

$$\tau = m \cdot a \cdot r \tag{3}$$

Donde a es la aceleración del vehículo, que se asignó un valor de 6.94 m/s², según lo reportado en la literatura (Patel et al., 2019). Los resultados obtenidos de las ecuaciones anteriores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño del vehículo FSAE eléctrico.

Parámetro	Símbolo	Valor
Masa (sumando el piloto)	m	300 kg
Radio de las ruedas	r	0.26
Velocidad máxima	v_{max}	110 km/h
Aceleración	a	6.94 m/s
Velocidad angular de la rueda	ω	116.77 rad/s
Potencia requerida	P	64 kW
Torque requerido	τ	545 Nm

A continuación, se seleccionó el modelo de motor eléctrico adecuado para esta aplicación. En este estudio, se optó por el Plettenberg Nova 15-70-B6 P30 LW, ya que su implementación en una configuración tipo IWM permite diseñar un sistema de transmisión más ligero. Además, este motor cumple con las normativas de la competencia, superando a otros motores empleados en aplicaciones similares (Camacho Guevara et al., 2024). Los datos técnicos más relevantes del motor se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones del motor Plettenberg Nova 15-70-B6 P30 LW.

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia	P_m	20 kW
Torque	τ_m	56 Nm
Velocidad angular	ω_m	5,500 RPM
Voltaje	U_m	120 V

En este contexto, dado que el motor debe montarse directamente en el eje de la rueda, se hace indispensable el uso de una reducción mecánica. A partir de la revisión del estado del arte, se concluye que un sistema de engranes planetarios representa la opción más adecuada para configuraciones tipo IWM (Daled y Schoenaers, 2014).

Por consiguiente, es necesario determinar un valor apropiado para la relación de transmisión. Este se determina mediante la Ec. 4, a partir de la cual se obtuvo un valor de $i = 4.9$.

$$i = \frac{\omega_m}{\omega} \tag{4}$$

Dado que los motores con configuración IWM permiten implementar tracción de dos ruedas (2WD) o en las cuatro ruedas (4WD), es necesario evaluar el desempeño de ambas configuraciones. Para ello, se calculan la potencia y el torque total disponibles en cada caso, utilizando las Ec. 5 y Ec. 6, respectivamente.

$$P_T = P_m \cdot n_m \tag{5}$$

$$\tau_T = \tau_m \cdot i \cdot n_m \tag{6}$$

Donde n_m es el número de motores. Los resultados obtenidos al aplicar las dos ecuaciones anteriores se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipos de tracción IWM considerando el motor Nova 15.

Tipo de tracción	Potencia	Torque
2WD	40 kW	548.8 Nm
AWD	80 kW	1,097.6 Nm

Dado que la configuración AWD es la que proporciona la potencia y el torque requeridos (según se muestra en la Tabla 1), se optó por esta modalidad de tracción. Posteriormente, se procedió a realizar la simulación del vehículo.

2.2 Configuración del vehículo FSAE en OptimumLap

Los parámetros definidos en la sección anterior son las entradas del programa OptimumLap, y los resultados obtenidos se ilustran en las Figuras 2 y 3.

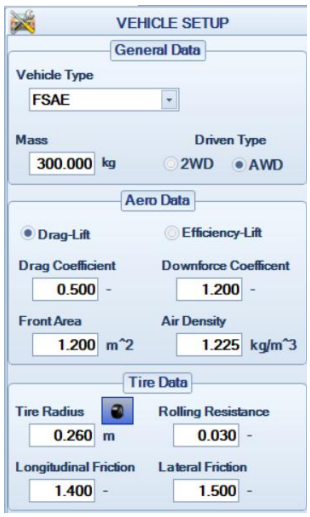


Fig. 2. Configuración del vehículo FSAE eléctrico.

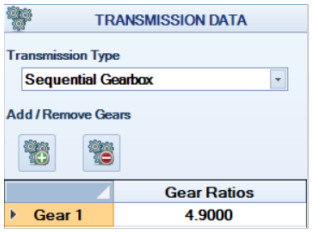


Fig. 3. Configuración de la caja de transmisión del vehículo FSAE eléctrico.

Como puede observarse en la Figura 2, se incluye información adicional relacionada con la aerodinámica del vehículo y las características de los neumáticos (más allá del radio previamente definido).

Por otro lado, la Figura 4 muestra la curva de operación del motor seleccionado. La curva azul representa la potencia en función de la velocidad angular, mientras que la curva negra describe la variación del torque.

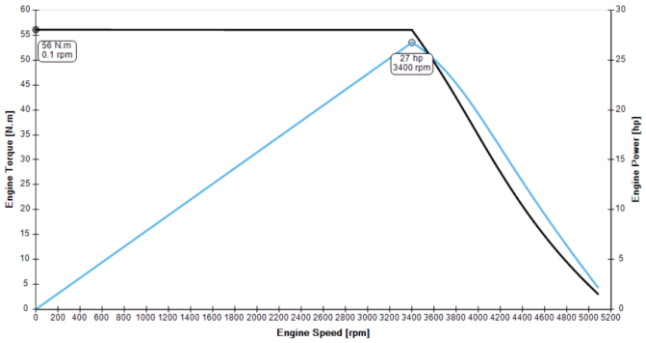


Fig. 4. Curva de operación del motor Nova 15-70-B6 P30 LW generada en OptimumLap.

De igual forma, para la simulación se especificó que la fuente de alimentación de los motores se realiza mediante baterías de iones de litio. Esta elección se fundamenta en que este tipo de baterías ofrece una mayor seguridad frente a los riesgos de flamabilidad, además de proporcionar una descarga de voltaje estable, lo cual garantiza una operación eficiente del motor (Gritsenko et al., 2021).

2.3 Simulación del vehículo FSAE eléctrico en pista

A partir de la información proporcionada y de la especificación del circuito deseado, se ejecuta la simulación del vehículo. El circuito utilizado se extrajo del módulo OptimumG (OptimumG, 2025), el cual ofrece a los usuarios una amplia variedad de pistas de carreras, incluidas algunas de las oficiales empleadas en ediciones anteriores de la competencia FSAE.

La pista seleccionada corresponde al evento de *endurance* de la edición 2012 en Alemania. Se eligió este circuito debido a su mayor longitud, lo que implica también una mayor duración, lo cual lo convierte en una referencia adecuada para evaluar el rendimiento del vehículo. El mapa de esta pista se muestra en la Figura 5.

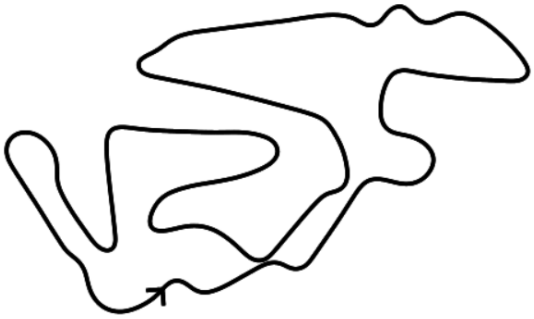


Fig. 5. Mapa del circuito Endurance Alemania 2012.

Con base en este circuito, se realizó la simulación y se obtuvo un consumo de energía de 1,791.44 kJ por vuelta. Dado que el evento de endurance consiste en completar 22 vueltas, el consumo de energía se incrementa proporcionalmente, resultando en un consumo aproximado de 39,412 kJ, equivalente a cerca de 11 kWh.

2.4 Dimensionamiento del paquete de baterías

Antes de proceder con el dimensionamiento del paquete de baterías, se revisaron las normas establecidas para el diseño de este componente, las cuales se detallan a continuación (Gritsenko et al., 2021):

- Las celdas pueden ser de cualquier tipo, exceptuando las de sal, combustible y térmicas.
- El voltaje máximo del paquete de baterías debe ser de 600 V.
- La potencia máxima del paquete de baterías está limitada a 80 kW.
- El paquete de baterías debe estar configurado en secciones.
- El voltaje máximo por sección es de 120 V.
- El almacenamiento máximo de energía por sección es de 1.66 kWh.

Siguiendo este marco de referencia, el paquete de baterías debe contar con un voltaje máximo (U) de 120 V, el cual corresponde al voltaje del motor seleccionado, y un almacenamiento de energía de 11 kWh.

Para definir el número de celdas conectadas en serie (n_{ser}), se emplea la Ec.7.

$$U = U_{bat} \cdot n_{ser} \quad (7)$$

Donde U_{bat} es el voltaje nominal de una celda. Para calcular el número de celdas conectadas en paralelo (n_{paral}) se utiliza la Ec. 8.

$$E = U \cdot C_{bat} \cdot n_{paral} \quad (8)$$

Donde E es la energía total del paquete de baterías y C_{bat} es la capacidad de una celda. En cuanto a la masa del paquete de baterías (m_{total}), esta se determina mediante la Ec. 9.

$$m_{total} = m_{bat} \cdot n_{ser} \cdot n_{paral} \quad (9)$$

Donde m_{bat} es la masa de una celda. Una vez establecidas las ecuaciones, se recopiló la información necesaria sobre diversas celdas que se han utilizado en vehículos eléctricos de FSAE. Los datos obtenidos se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Listado de celdas utilizadas en vehículos FSAE eléctricos.

Modelo de la celda	Voltaje nominal, U_{bat} (V)	Capacidad, C_{bat} (Ah)	Masa, m_{bat} (kg)
EVELF50-73103	3.64	50	1.38
A123 AMP20m1HD-A	3.3	20	0.496
Melasta SLPBA375175	4.2	15	0.31
Melasta SLPBA875175	3.7	15	0.3025
VTC6 Sony/Murata 2x4	3.6	24	0.448
Electric Power EPB097197VVP	3.9	30	0.45

Posteriormente, se aplicaron las ecuaciones mencionadas, considerando las características técnicas de cada modelo de celda de manera individual, y se dimensionó un paquete de baterías para cada celda. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5, donde se detalla el número de celdas y la masa total correspondiente.

Tabla 5. Resultados del dimensionamiento de los paquetes de baterías en función del número de celdas y masa total.

Modelo de la celda	n_{ser}	n_{paral}	m_{total} (kg)
EVELF50-73103	33	2	91.08
A123 AMP20m1HD-A	37	5	91.76
Melasta SLPBA375175	29	7	62.93
Melasta SLPBA875175	33	7	69.88
VTC6 Sony/Murata 2x4	34	4	60.93
Electric Power EPB097197VVP	31	3	41.85

Por el otro lado, en la Tabla 6 se presentan los resultados de los cálculos en términos de voltaje y almacenamiento de energía.

Tabla 6. Resultados del dimensionamiento de los paquetes de baterías en función del voltaje y energía almacenada.

Modelo de la celda	Voltaje total (V)	Energía total (kWh)
EVELF50-73103	120.12	12
A123 AMP20m1HD-A	122.1	12.21
Melasta SLPBA375175	126	13.23
Melasta SLPBA875175	122.1	12.82
VTC6 Sony/Murata 2x4	122.4	11.75
Electric Power EPB097197VVP	124.8	11.23

Cabe destacar que los valores de (n_{ser}) y (n_{paral}) fueron redondeados al número entero más cercano, dado que no es posible disponer de un número decimal de celdas. Después de analizar los resultados, se concluyó que la opción más favorable en términos de la relación de energía-masa corresponde al paquete de baterías que utiliza celdas Electric Power EPB097197VVP. Por tanto, se seleccionó este modelo de celda para el diseño final.

2.5 Configuración del paquete de baterías

Finalmente, se distribuyeron las celdas en secciones, de acuerdo con lo indicado en el reglamento. Con el objetivo de lograr una distribución equilibrada de energía y asegurar una descarga uniforme entre las secciones, se incrementó el número de celdas conectadas en serie (n_{ser}) a 32.

Lo anteriormente mencionado da lugar a una configuración del paquete de baterías compuesta por tres filas conectadas en paralelo, donde cada fila está formada por 32 celdas conectadas en serie. Así, el número total de celdas es 96.

Consecuentemente, se definieron ocho secciones, cada una compuesta por tres filas en paralelo, con cuatro celdas conectadas en serie en cada fila. Cada sección cuenta con un voltaje de 15.6 V y un almacenamiento de energía de 1.4 kWh.

3. RESULTADOS

El paquete de baterías dimensionado está formado por 96 celdas modelo Electric Power EPB097197VVP, lo que permite suministrar un voltaje de 124.8 V y un almacenamiento de energía de 11.23 kWh. La configuración del paquete corresponde a un arreglo 32s x 3p, lo que indica que se conectan tres filas en paralelo, con 32 celdas conectadas en serie en cada fila. Además, el paquete de baterías fue dividido en ocho secciones, cada una de las cuales cumple con las restricciones establecidas por la normativa de la competencia. El esquema de configuración de este componente se muestra en la Figura 6.

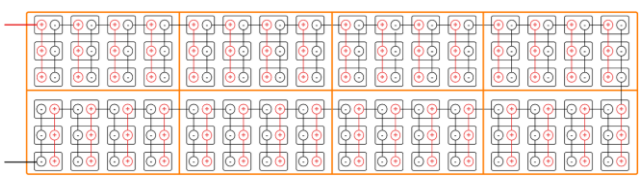


Fig. 6. Esquema de la configuración final del paquete de baterías.

Finalmente, se destaca que la masa total del paquete de baterías es de 43.2 kg. En cuanto a su autonomía, se estima en aproximadamente 31 km, lo que permite al vehículo completar entre 22 y 25 vueltas, dependiendo de la longitud del circuito del evento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología para el dimensionamiento de un paquete de baterías destinado a un vehículo eléctrico de Fórmula SAE basado en una transmisión tipo IWM. Para esto, se utilizó el software de simulación de OptimumLap para calcular el consumo de energía aproximado del vehículo, considerando los parámetros de diseño propuestos. Asimismo, se investigaron los diferentes modelos de celdas utilizadas en la construcción de paquetes de baterías para este tipo de vehículos. Mediante teorías de diseño aplicadas, fue posible seleccionar el modelo de celda más adecuado, en términos de masa y energía.

Con base en estos resultados, se dimensionó un paquete de baterías enfocado en reducir la masa total del vehículo, a la vez que se asegura el suministro de la energía necesaria para completar las pruebas de la competencia. Además, se garantizó el cumplimiento de los parámetros establecidos en el reglamento oficial de la competencia FSAE para prototipos eléctricos.

Como trabajo futuro, se propone el desarrollo de un modelo de placa BMS (Sistema de Gestión de Baterías, por sus siglas en inglés) para complementar y optimizar el diseño del paquete de baterías.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento por parte de los autores a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero brindado a través del programa de becas para estudios de posgrado, otorgada a Melchor Alejandro Camacho Guevara.

REFERENCIAS

Bakshi, S., Dhillon, P. y Maruvada, T., 2014. Design and optimization of planetary gearbox for a formula student vehicle. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 7(3), pp. 688-697.

Camacho Guevara, M. A., Davila De La Peña, R. R., Rosado-Tamariz, E. y Campos-Amezcua, R., 2024. Análisis de un sistema de transmisión tipo imw para un vehículo fórmula sae. MEMORIAS DEL XXX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, pp. 19-28.

Carraro, E., Degano, M., Morandin, M. y Bianchi, N., 2013. Formula sae electric competition: electrical motor design. 2013 International Electric Machines & Drives Conference., pp. 1142-1148.

Cezayirlioğlu, M. y Büyük, M., 2017-2018. Development of wheel hub motor drive application in electric vehicles. Sabancı University Program for Undergraduate Research (PURE) .

Costa, R. P. y Bortolussi, R., 2016. Lap time simulation of formula sae vehicle with quasi-steady state model. SAE Technical Paper, Issue 2016-36-0164.

Daled, H. y Schoenaers, R., 2014. Design and realization of a lightweight mechanical drivetrain for an electric formula student racecar. KU Leuven.

Deepak, K. y otros, 2023. In-wheel motor drive systems for electric vehicles: State of the art, challenges, and future trends. Energies, 16(7), p. 3121.

Doyle, D. A., Cunningham, G., White, G. y Early, J., 2019. Lap time simulation tool for the development of an electric formula student car. SAE Technical Paper, Issue 2019-01-0163.

Gritsenko, A. V., Shepelev, V. D. y Lopukhov, 2021. Selection and Calculation of the formula student racecar battery. In International Conference on Industrial Engineering, pp. 390-398.

Guia, A. R., Silva, R. A., Pires, I. A. y Maia, T. A. C., 2020. In-wheel traction motor: a case study for formula sae electric. Congresso Brasileiro de Automática-CBA, 2(1).

Hu, X. y otros, 2017. Development of a high-power-density motor for formula sae electric race car. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6618-6622.

Jneid, M. S., Harth, P. y Ficzere, P., 2020. In-wheel-motor electric vehicles and their associated drivetrains. International Journal for Traffic and Transport Engineering, 10(4), pp. 415-431.

OptimumG, 2025. Optimum G vehicle dynamics solutions. [En línea] Available at: https://optimumg.com/

Patel, T., Dubey, A. y Rao, L. B., 2019. Design and analysis of an epicyclic gearbox for an electric drivetrain. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 8(3), pp. 6834-6842.

Rohithraj, N. y Arun Sundar, S., 2020. Formula electric vehicle wheel hub design and optimization for in-hub motor in rear wheel drive configuration. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 9(7), pp. 122-126.

SAE International, 2025. Formula SAE. [En línea] Available at: https://www.fsaeonline.com/

Schumacher, S. y otros, 2021. Design, simulation and optimization of an electrical drive-train. Vehicles, 3(3), pp. 390-405.

White, G., Cunningham, G. y Doyle, D., 2019. Design of an electric drive transmission for a formula student race car. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 1(2019-01-1295), pp. 1345-1351.

Design and Implementation of a Low-Cost LIN Bus Automotive Controller

Solís Rayas, Marisol del Rocío*, Muñoz Moreno, Gilberto*, Juárez Balderas, Mario Alberto, López Núñez, Adolfo Rafael****

** Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, 36821.*
(e-mail: {MIP23110015, gilberto.mm}@irapuato.tecnm.mx).

*** Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, 36821*
(e-mail: {mario.jb, adolfo.ln}@irapuato.tecnm.mx)

Abstract: Over the last few years, the global automotive industry has undergone significant electrical and electronic (E/E) transformation. These technological changes are driven by the integration of numerous Electronic Control Units (ECUs). The Local Interconnect Network (LIN) Bus is a key automotive standard used for non-critical E/E vehicle systems, such as interior lighting, switches, and rain sensors. This paper presents the design of an automotive device that simplifies this technology: a low-cost LIN Bus automotive controller. The primary objective is to develop a controller for this system at a minimal investment. We met this goal by specific objectives: researching accessible electronic components, creating a schematic diagram, executing the necessary programming, and performing testing to validate the LIN Bus signal acquisition. The project used a two-phase method, covering both hardware and software. The hardware phase focuses on designing and fabricating a portable LIN Bus controller using a prototype Printed Circuit Board (PCB). The software phase involves programming a microcontroller to manage LIN communication and establishing a Bluetooth® connection with a mobile application developed in Android Studio®. By creating a portable ECU for controlling and inspecting automotive parts, this project allows engineers to perform faster analysis and product design validations without disrupting production lines. One of the most important benefits is the minimal investment required for the total cost of the controller. This solution could significantly benefit automotive manufacturers by accelerating project timelines, meeting the industry standards and preventing potential production shortages accelerating product development.

Keywords: Automotive, Local Interconnect Network (LIN), Electronic Controls Units (ECU).

1. INTRODUCCIÓN

El sector automotriz en México es uno de los más sólidos a nivel mundial, lo que lo convierte en un pilar fundamental para la economía del país. Solo en 2024, sus contribuciones al Producto Interno Bruto (PIB) alcanzaron una cifra de 4.5% (INEGI y Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, ver Figura 1). Gracias a este impacto, tanto la producción de vehículos como la de autopartes se han consolidado como sectores clave (ver Figura 2) para el desarrollo económico de México (García, 2020).

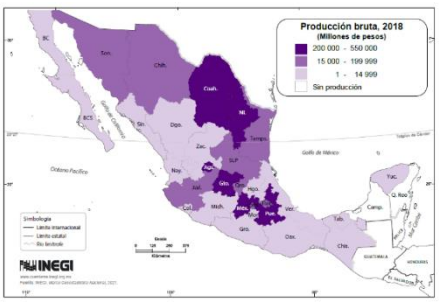


Figura 1. Producción bruta de la industria automotriz en las entidades federativas (INEGI, 2024).

Este éxito no solo se basa en la capacidad de producción, sino también en el trabajo del equipo de ingeniería de validación y desarrollo que aseguran la calidad, seguridad y durabilidad de los productos.

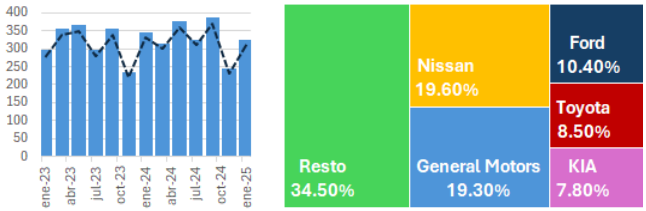


Figura 2. Producción trimestral de vehículos en Miles de Unidades en México de lado izquierdo (2023-2024) y participación por marcas (%) del lado derecho, (Quiroz, 2025).

Desde la fase de diseño de prototipos, el equipo de ingeniería debe aplicar rigurosos procesos de validación para cumplir con estándares (ej. IATF 16949), en donde entran pruebas de durabilidad en climas extremos (85°C/-40°C), vibraciones y corrosión, para simular la vida útil de los componentes.

1.1 Dispositivos de diagnóstico y validación automotriz

Los protocolos de comunicación automotriz son reglas o "lenguajes" estandarizados que permiten el intercambio de datos entre las diversas computadoras de un vehículo, conocidas como Unidades de Control Electrónico (ECUs).

Estos protocolos son esenciales para el desarrollo y validación de sistemas automotrices, asegurando que los componentes electrónicos funcionen de manera fiable. Un ejemplo de estos es el protocolo LIN (Local Interconnect Network), un estándar de bajo costo para la comunicación de sistemas no críticos como el control de ventanas, espejos y luces interiores. Para las fases de desarrollo y validación en un nuevo proyecto automotriz, los ingenieros utilizan herramientas especializadas que se adaptan a la complejidad de cada etapa. Tres dispositivos actuales utilizados en este campo son: Baby LIN de la empresa Lipowsky® es ideal para pruebas iniciales y desarrollos básicos, ya que su costo y facilidad de uso lo hacen perfecto para el prototipado. Por otro lado, los módulos de National Instruments® (NI) LIN están orientados a la integración en líneas de producción. Finalmente, CANoe de Vector® representa la solución profesional de la industria, utilizada para simulación avanzada y validación de sistemas y subsistemas con el soporte de diferentes protocolos.

Tabla 1. Controladores Automotrices para Sistemas LIN.

Producto	BabyLIN-II	USB-8476	CANoe
Características	Su compra incluye Hardware y Software.	Venta de Hardware y Software por separado.	Venta de Hardware y Software por separado.
Protocolos soportados	LIN	LIN	LIN, CAN, FlexRay, Ethernet
Aplicaciones	• Diagnóstico y pruebas en componentes prototipos y serie.	• Diagnóstico de componentes. • Validación de componentes en líneas de producción.	• Desarrollo de productos. • Diagnóstico y pruebas en componentes prototipos y serie.
Precio (2025)*	~550 EUR	~600–800 USD	~2,000 EUR
Imagen (L.I.E GmbH, 2025)* (N.I. Corp, 2025)* (V.I. GmbH, 2025)*			

A partir de la información presentada en la Tabla 1, se puede observar que el elevado costo de los dispositivos de validación puede representar una limitación significativa para las pequeñas empresas automotrices. Este factor no sólo restringe el acceso a los dispositivos, sino que también puede generar retrasos en la validación de prototipos e inspecciones de calidad. En el peor de los casos, puede llevar al uso de herramientas inadecuadas, lo que compromete la fiabilidad de los resultados y la calidad de los productos.

Para abordar esta problemática, el presente artículo se centra en el diseño de un controlador LIN Bus de bajo costo. El desarrollo esquemático se detalla en la sección 2.1, incluyendo la selección de componentes electrónicos accesibles, como microcontroladores compatibles con el protocolo LIN utilizados para la programación de la comunicación. El proyecto se fundamenta en el uso de software de código abierto (C++ y Java para Android Studio), tomando como base el protocolo automotriz LIN. El objetivo es establecer una comunicación bidireccional fiable para la validación de accesorios automotrices, lo cual se detalla en la sección 2.2. Finalmente, en la sección 3 se presentan la señal obtenida del proyecto, así como el futuro desarrollo en curso. En la sección 4 se analizan el impacto y las implicaciones que este proyecto podría tener en pequeñas empresas automotrices.

2. METODOLOGÍA

Para comenzar con el diseño del controlador LIN Bus de bajo costo, se ha planteado un diagrama de bloques con el fin de definir las etapas de desarrollo que tendrá el dispositivo (ver Figura 3).

Figura 3. Diagrama de bloques del controlador LIN Bus de bajo costo.

2.1 Hardware controlador LIN Bus

Para el desarrollo del hardware se optó por el microcontrolador Teensy 4.0®, que soporta el mismo lenguaje de programación que Arduino® (C++), y es un 20% más económico (Russ, 2023). Este dispositivo funcionará como la unidad de control electrónico (ECU) del sistema. Para la comunicación LIN, se seleccionó el circuito integrado MCP2003A de Microchip®, mientras que para la comunicación Bluetooth® se consideró el ESP32C3 (ver Figura 4). Todos estos componentes se complementan con capacitores y resistencias, además de un regulador de voltaje de 12V a 5V. La inclusión de este regulador es crucial, ya que para simular un sistema automotriz debemos usar los 12V que provee la batería del auto. Sin embargo, tanto el microcontrolador Teensy 4.0 como el circuito Bluetooth® ESP32C3 solo pueden operar con un máximo de 5V.

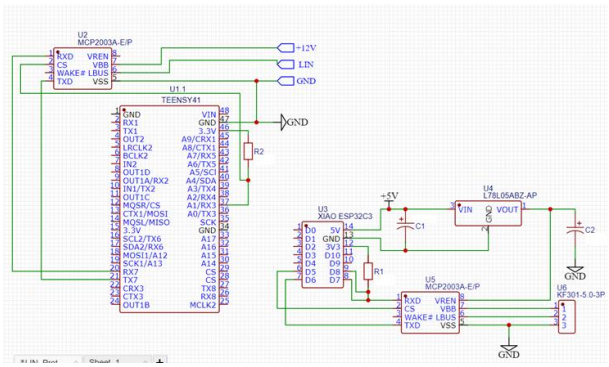


Figura 4. Diagrama esquemático prototipo de controlador automotriz LIN Bus.

A continuación, la Tabla 2 detalla el costo de cada componente utilizado en el proyecto y el costo total del prototipo. Además, se especifica que los softwares utilizados serán de libre acceso, lo cual contribuye a la viabilidad económica del desarrollo.

Tabla 2. Costos de Hardware & Software propuestos para el controlador de bajo costo LIN Bus.

Producto	Costo (MXN)
Microcontrolador “Teensy 4.0”	$446.62
Circuito Integrado “ESP32C3”	$27
Circuito Integrado Microchip “MCP2003A”	$121.81
Resistencias, Capacitores, Reguladores de voltaje	$50

IDE Arduino	$0
Android Studio	$0
Total	**$767.24**

2.2 Software controlador LIN Bus

Como se mencionó previamente, para el desarrollo del software, utilizaremos el IDE de Arduino® con un lenguaje basado en C++ para la comunicación LIN Bus. Por su parte, la transmisión de la señal al accesorio automotriz se realizará a través de una aplicación orientada a objetos en Android Studio®. Para garantizar una comunicación fluida entre las señales, es fundamental comprender los principios básicos del protocolo LIN Bus. El protocolo LIN es un BUS serial de comunicación maestro/esclavo diseñado específicamente para crear un estándar de comunicación no crítica en redes automotrices (Sánchez, 2016). Es un protocolo de bajo costo que pertenece a la clase A dentro de la clasificación de la SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) (ver tabla 3), ofrece una baja velocidad de transferencia de datos de 20 kbps. Las redes LIN suelen funcionar como subredes de una red principal CAN.

Tabla 3. Clasificación SAE de protocolos de comunicación automotrices (SAE International, 2002).

Clase	A	B	C
Tipo	LIN	CAN	Ethernet*
Clasificación	No crítica	Crítica	Alta Velocidad
Velocidad de transmisión	20 kbps	1 Mbps	10 Mbps / 10 Gbps
Configuración física	1 cable	2 cables trenzados	4 cables trenzados
Aplicaciones	Interruptores de espejos, ventanas, sensores de lluvia.	Sistemas ABS, ASR, ESP	Sistemas multimedia.

Las principales características del LIN Bus son:

- La topología se compone de un solo nodo maestro y hasta 16 nodos esclavos (ver Figura 5). Utiliza un único cable de hasta 40 metros de longitud y transporta datos a una velocidad de 20 kb/s.

- Longitud de datos transportados 8 bytes (hexadecimal), voltaje de operación nominal: 12 VDC, 30 VCD máx.

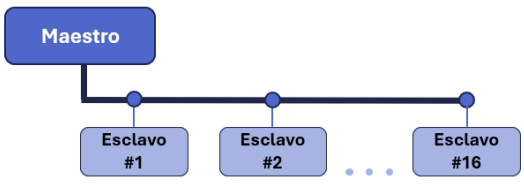


Figura 5. Topología de LIN BUS, 1 maestro, 16 esclavos, (Páez, 2022).

La configuración estándar de un comando en la comunicación LIN se muestra en la Figura 6. Un comando se divide en un "requerimiento" (generado por el nodo maestro) y una "respuesta" (generada por el nodo esclavo o, en el caso de transmisión de datos a los nodos esclavos, por el propio nodo maestro) (Páez, 2022). La señal física del Bus LIN se caracteriza por su naturaleza de onda cuadrada, al observar la señal en un osciloscopio, se puede visualizar un tren de pulsos cuadrados (transmisión de comandos), estos pulsos alternan entre dos niveles de voltaje: el estado a tierra "0 V" y el nivel de la batería "12 V", (ver Figura 7).

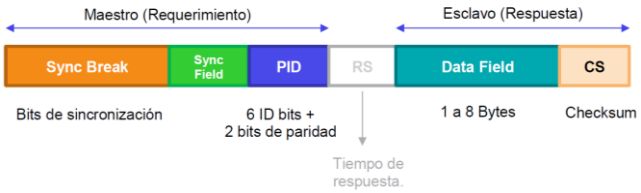


Figura 6. Estructura de un comando LIN Bus (Páez, 2022).

Una vez que se ha comprendido la forma de la señal, es crucial entender cómo los pulsos cuadrados se agrupan para formar los datos que se transmiten a las computadoras de los automóviles. A continuación, en la Tabla 4, se presenta un ejemplo básico de un comando LIN en formato hexadecimal para activar la apertura de una ventana.

Figura 7. Representación física en un osciloscopio de una señal LIN Bus (De Multimeter, 2021).

Tabla 4. Ejemplo de comando LIN Bus para el control de una ventana.

Sync	ID	Data Length	Data Position	CS
0x55	0xA	0x01	0x64	0xAB

Donde:

- **0x55**: Es el byte de sincronización del Bus LIN.
- **0xA**: Este es el byte de identificación de la ventana.
- **0x01**: Este byte indica que solo se enviará una instrucción.
- **0x64**: Representa el posicionamiento del motor para la activación de la ventana. El valor decimal de 0x64 es 100, que en porcentaje indica el 100%. Para cerrar la ventana, este byte debe cambiarse a 0x00, lo que representa el 0% de la posición original del motor.
- **0xAB**: Este es el byte de Checksum, que se usa para verificar que la instrucción se ha enviado y recibido correctamente. Su valor no debe exceder de 256 (el valor máximo para un byte de 8 bits).

Considerando lo anterior, procederemos a diseñar nuestro programa en C++, teniendo en cuenta los siguientes puntos clave: la velocidad de transmisión (20 kbps) y que la declaración de comandos LIN no debe sobrepasar los 8 bits (256 valores). Para la aplicación móvil en Android Studio®, se implementará una conexión vía Bluetooth® para comunicar y

controlar al menos tres accesorios automotrices. La aplicación contará con un menú principal, que incluirá tres botones dedicados a la activación de la luz direccional derecha, la luz direccional izquierda y el motor de una ventana (ver Figura 8).

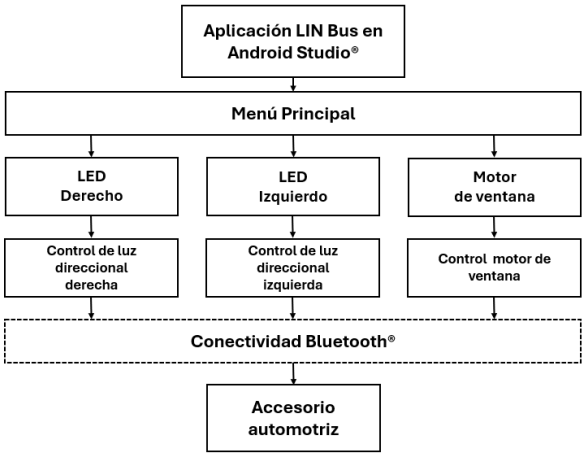


Figura 8. Topología para aplicación móvil de controlador LIN Bus.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Siguiendo la configuración eléctrica del esquemático en la sección 2.1, la Figura 9 muestra la configuración y montaje de integración de hardware y software utilizado para obtener la señal esperada del Bus LIN. El comando utilizado para esta prueba es el mismo que se usó anteriormente como ejemplo para la activación de una ventana en la Tabla 3.

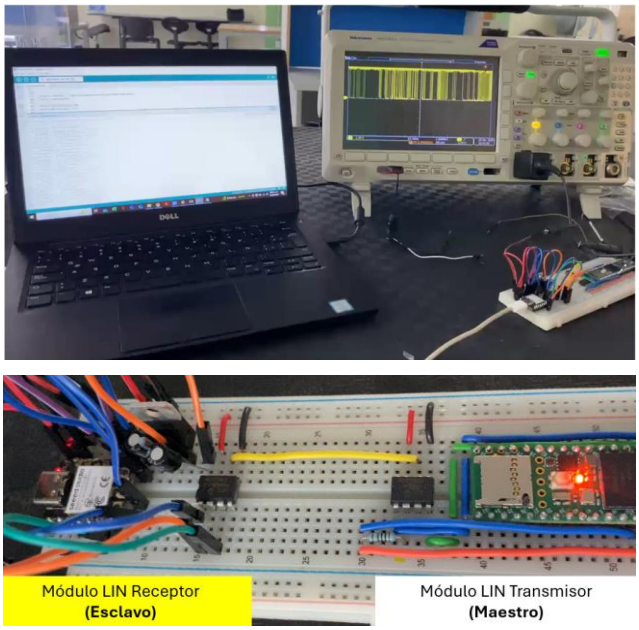


Figura 9. Montaje y configuración del sistema prototipo de comunicación LIN Bus.

El análisis de la señal capturada en el osciloscopio (Figura 10) confirma el cumplimiento de las especificaciones del protocolo LIN: los niveles de tensión del bus se mantienen entre 0 y 12V, y se establece una velocidad de 20 kbps para cumplir con el estándar. Además, la estructura de la trama muestra un tiempo de sincronización de respuesta, lo que demuestra que la transmisión cumple con la temporización, los niveles de voltaje y el formato del protocolo LIN, confirmando su correcta implementación.

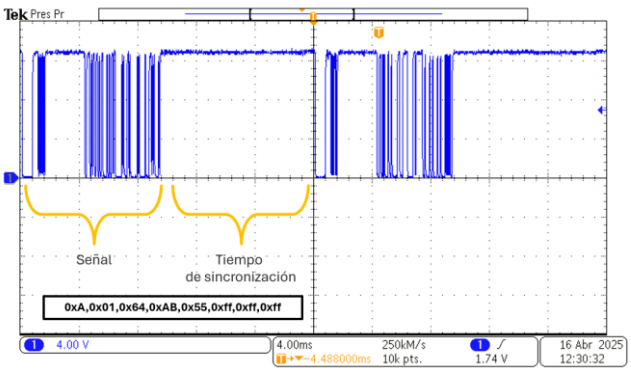


Figura 10. Validación de la Señal LIN Bus para el comando de Control de Ventana en Osciloscopio.

En la Figura 11 se presenta la aplicación móvil en desarrollo, creada con Android Studio®. La interfaz muestra el prototipo del menú principal, el cual incorpora los tres botones mencionados previamente en la sección 2.2 (ver Figura 8). Estos controles, que operarán a través de Bluetooth®, están diseñados para activar la luz direccional derecha, la luz direccional izquierda y el motor de una ventana. Este diseño inicial permite una interfaz de usuario sencilla e intuitiva para controlar las funciones del vehículo a través de una conexión inalámbrica.

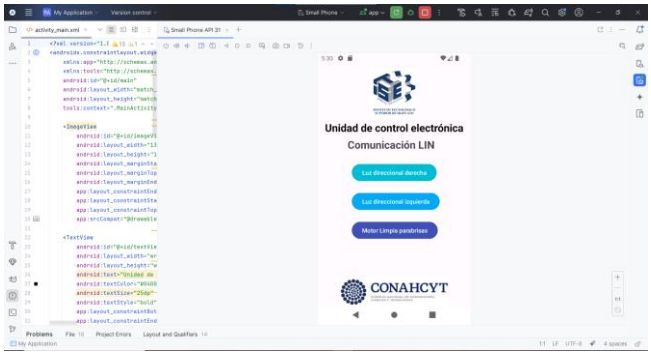


Figura 11. Prototipo de la aplicación móvil: Interfaz para el control de accesorios automotrices (LED/Motor) vía LIN Bus.

4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta ha demostrado ser exitosa al validar la señal esperada del Bus LIN mediante la instrumentación con osciloscopio, corroborando así la correcta transmisión de datos. Adicionalmente, este proyecto destaca, no solo por su éxito funcional, sino también por su rentabilidad. La solución de bajo costo propuesta ($767.24 MXN) representa una alternativa económicamente viable frente a los controladores profesionales del mercado. Por ejemplo, al comparar este costo con el de un controlador de alta gama mencionado en la Tabla 1 como el Baby LIN, valorado en €550 (aproximadamente $11,925 MXN), se evidencia un ahorro de aproximadamente más del 90%. Esta significativa diferencia de precio es clave, ya que brinda a las pequeñas empresas automotrices con recursos limitados la posibilidad de acceder a herramientas de validación asequibles, y realizar validaciones tempranas de prototipos o componentes en serie, lo que significa un paso

fundamental para evitar costosas multas por retrasos o sanciones de calidad.

REFERENCIAS

De Multimeter (2021). *Mazda MX-5: Onzichtbare draden.* Disponible en: https://www.demultimeter.nl/Mazda-MX-5-*Onzichtbare-draden*/ (Consultado: 22 de septiembre de 2025).

García M., Cardenete M., Muñoz P., Venegas F. (2020). *Valoración del impacto de la industria automotriz en la economía mexicana: una aproximación mediante matrices de contabilidad social.* EL TRIMESTRE ECONÓMICO, vol. LXXXVII (2), núm. 346. pp. 439-440.

INEGI (2024). *Colección de estudios sectoriales y regionales. Conociendo la industria automotriz.* p. 8.

L. I. E. GmbH (2025). *BABY-LIN-II LIN-Bus simulation device with USB interface.* Disponible en: https://lipowsky.com/products/Baby-Lin-II (Consultado: 13 de julio de 2025).

N. I. CORP (2025). *USB-8476*. Disponible en: https://www.ni.com/es-mx/support/model.usb-8476.html?srsltid=AfmBOorriINShCKZJtAi7Syfq0tMy6djeQ6OdWa-Uo4E27GrcKQ_BYmW (Consultado: 13 de julio de 2025).

Páez F., Kaschel H. (2022). *Design and Testing of a Computer Security Layer for the LIN Bus.* Sensors, 22(6901). MDPI. p. 4.

Quiroz J., Rubio R. (2025). *Análisis Sectorial: Industria Automotriz. MONEX Análisis Económico, Cambiario y Bursátil*. Nota Económica. p. 1.

Russ R. (2023). *Building both a LIN Master and Slave/Sniffer using the Arduino based Teensy 4.0 and XIAO ESP32C3.* Disponible en: https://www.udemy.com/topic/embedded-systems/ (Consultado: 22 de septiembre de 2025).

SAE International (2002). *Standard J2058*.

Sánchez L., Molano M., Fabela M. Martínez M. Hernández J. Vázquez D., Flores O. (2016). *Revisión documental del protocolo CAN como herramienta de comunicación y aplicación en vehículos.* SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. ISSN 0188-7297.

V. I. GmbH (2010-2025). *VN1600 - Interfaces de red con USB y Ethernet para CAN / CAN FD / CAN XL, LIN, K-Line, J1708 e IO*. Disponible en: https://www.vector.com/es/es/productos/products-a-z/hardware/network-interfaces/vn16xx/ (Consultado: 13 de julio de 2025).

Apéndice A. EVALUACIÓN DE PLAGIO

Para asegurar la originalidad del contenido, el manuscrito fue analizado mediante la herramienta iThenticate. Esta arrojó un índice de similitud del 7%, el cual se considera aceptable por estar muy por debajo del rango límite del 25%. El identificador de entrega es trn:oid:::3117:502597416 (ver Figura 12).

Figura 12. Reporte de similitud de iThenticate del artículo 'Design and Implementation of a Low-Cost LIN Bus Automotive Controller'.

Integrated Methodology for the Design and Topological Optimization of an Upright for an FSAE Electric Vehicle

Davila De La Peña, Rene Reiyel*, Camacho Guevara, Melchor Alejandro*, Rosado-Tamariz, Erik*, Campos Amezcua, Rafael*

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira 62490, Cuernavaca, México.*
(e-mail: m23ce153@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: The design and structural optimization of automotive components are essential achieving high-performance, lightweight parts in vehicles, such as those in the Formula Student category. In this study, a methodology was developed that begins with the conceptualization of a wheel drive system for an FSAE-type electric vehicle, knowing the required specifications, and continues through its subsequent topological optimization. By systematically analyzing the performance of the upright before and after the optimization process, this research aims to provide valuable insights into the optimal design of a critical component in Formula vehicles, combining design processes, finite element analysis, and optimization techniques. A key focus of this work is the reduction of the vehicle's unsprung mass, as speed and lap time are crucial factors in determining success during FSAE competitions. Furthermore, this reduction directly influences dynamic response and load transfer efficiency during maneuvers such as acceleration, braking, and cornering. In this regard, the implementation of the proposed methodology not only enhances the structural performance of the component while minimizing its mass but also contributes to the overall behavior of the vehicle. The results are intended to serve as a basic guide for the proper design of such components in the steering and suspension systems from the outset, without the need to overestimate their dimensions to achieve optimal vehicle performance. Beyond the specific case studied, the methodology developed in this work can be generalized and applied to other structural components within the suspension and steering systems.

Keywords: FSAE, Upright, FEA, Topology Optimization, Unsprung Mass, Lightweight.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente interés de la industria automotriz por adoptar soluciones más sostenibles se refleja en la modernización y sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos. Un claro ejemplo de esta tendencia se observa en la Fórmula estudiantil, donde la electrificación de los vehículos se presenta como un paso importante hacia la neutralidad del carbono. Sin embargo, este avance también implica una serie de desafíos técnicos que deben superarse, especialmente cuando se trata de vehículos con sistemas de transmisión con motores integrados en las ruedas (IWM, por sus siglas en inglés) (Salek *et al.*, 2022).

Un vehículo con transmisión tipo IWM simplifica el tren motriz, lo que mejora tanto el diseño como el aprovechamiento del espacio, y permite un control dinámico avanzado, resultando en un mejor rendimiento. Sin embargo, esta configuración también incrementa la masa no suspendida, que corresponde a la masa no soportada por el chasis del vehículo. Esto plantea la necesidad de soluciones innovadoras para su implementación (Rojas *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2024). Una de estas soluciones es la optimización de la mangueta de dirección, la cual es crucial para el sistema de dirección y suspensión del vehículo.

La mangueta es el componente que contiene al cubo o eje sobre el que gira la rueda, y se conecta simultáneamente con los elementos de la suspensión y la dirección. El freno y la rueda están acoplados al cubo mediante un buje que rota mientras se apoya en la mangueta. Además, la mangueta sigue los movimientos de la suspensión y gira alrededor del eje de pivote geométrico. También proporciona el alojamiento necesario para el montaje de la mordaza de freno (Shuaib, Haleem y Kumar, 2019).

En este contexto, la mangueta actúa como la base sobre la que se montará el sistema de transmisión en las ruedas, lo que resalta la importancia de que sea un componente ligero pero resistente, capaz de soportar adecuadamente las cargas a las que estará expuesto. Dado que su diseño debe ser más detallado, no solo debe resistir estas cargas, sino también integrar el motor de la rueda, lo que aumenta la necesidad de un componente rígido y durable (Santana *et al.*, 2024).

La Figura 1 muestra la ubicación de la mangueta en el sistema de suspensión y dirección diseñado para un vehículo de Fórmula estudiantil, con la finalidad de ofrecer una visualización clara de su posición.

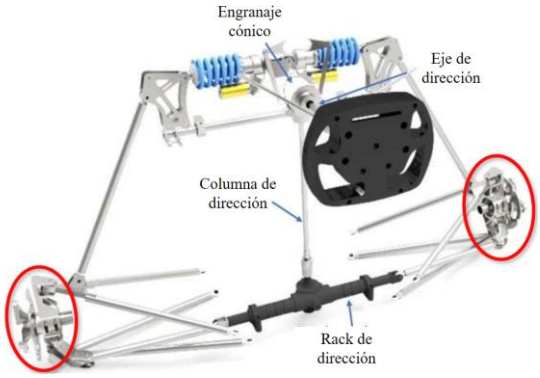


Fig. 1. Posición de referencia de la mangueta de dirección en el sistema de suspensión y dirección de un vehículo Fórmula estudiantil basado en (Gautam *et al.*, 2021) .

Por esta razón, es fundamental realizar un análisis adecuado del comportamiento del componente mediante simulaciones por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés), ya que esta herramienta permite iterar diseños de manera eficiente. Combinada con el proceso de optimización topológica, facilita la distribución del material bajo restricciones estructurales específicas (Wu, Sigmund y Groen, 2021).

Teniendo esto en cuenta, la competencia Fórmula SAE (FSAE) motiva a estudiantes de nivel universitario y de posgrado a diseñar, construir y evaluar prototipos de vehículos. En este entorno, cada uno de componente del vehículo cumple una función crítica y debe ser diseñado de manera eficiente, sin comprometer propiedades mecánicas fundamentales como la rigidez o la resistencia (Carraro *et al.*, 2013).

Mediante la revisión de la literatura, se identificaron aspectos clave para el diseño y la posterior optimización topológica de una mangueta de dirección topológica para un vehículo FSAE eléctrico con transmisión tipo IWM.

En relación con lo anterior, Prabowo *et al.* (2022) propusieron un proceso para diseñar un auto de carreras y definir los criterios de diseño. Este proceso incluía datos relacionados con el soporte de la mangueta, tales como el material a utilizar, las cargas de trabajo y las restricciones geométricas iniciales sin modificaciones. A continuación, realizaron una simulación estática de la estructura utilizando un software de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por sus siglas en inglés). Y, posteriormente, llevaron a cabo la optimización de la topología. Finalmente, realizaron una última simulación utilizando un software FEM, obteniendo un diseño que redujo la masa en un 43% y presentó un valor de esfuerzo de von Mises de 50.22 MPa. Los autores concluyeron que la geometría definida en su estudio requiere más investigación, particularmente en cuanto al proceso y método de manufactura.

Por otra lado, Naveed *et al.* (2022) consideraron las dimensiones originales de un vehículo, así como las conexiones del eje, la suspensión y la dirección, para el diseño de una mangueta. Además, realizaron una comparación entre una aleación de acero y una aleación de aluminio para su fabricación. Evaluaron el comportamiento de la mangueta bajo condiciones extremas de esfuerzos y deformaciones con el fin de establecer los puntos de referencia para el proceso de optimización del componente. Concluyeron que los modelos de las manguetas, en general, están sobredimensionados para el sistema de dirección y presentaron resultados que permitieron reducir la masa de la mangueta en un 18%. Además, el diseño final fue considerado satisfactorio, ya que el factor de seguridad resultante fue superior a uno.

A su vez, Liu, Li y Tian (2023) se enfocaron en la reducción de masa de manguetas de dirección para vehículos convencionales, utilizando procesos de manufactura aditiva. Partiendo de un modelo de referencia, realizaron un análisis estático estructural en el que definieron las cargas que el componente debería soportar. Con base en los resultados obtenidos, determinaron que el acero inoxidable era un material adecuado para la fabricación de la mangueta, debido a su buena resistencia y ductilidad. La optimización topológica la realizaron identificando las áreas de exclusión y las zonas sujetas a optimización dentro del diseño. Como resultado, lograron una reducción del 16% en la masa del componente respecto al modelo original.

Por ello, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar y evaluar el proceso de diseño y optimización para la generación de una mangueta destinada a un vehículo eléctrico con una transmisión tipo IWM, en el contexto de la competencia FSAE.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo, se implementó la metodología representada en la Figura 2, la cual será explicada en las siguientes secciones.

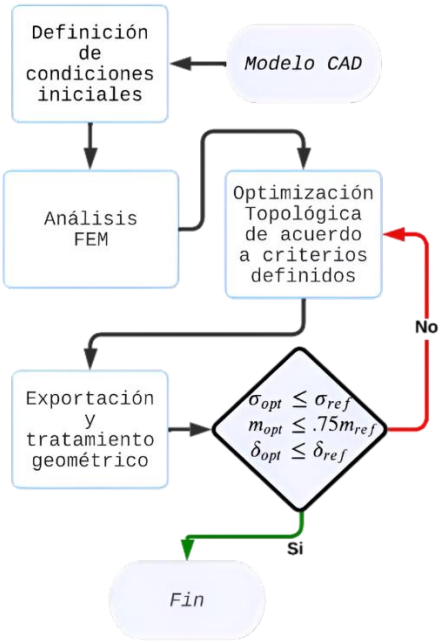


Fig. 2. Metodología para la optimización topológica de la mangueta de dirección de un vehículo Fórmula estudiantil.

2.1 Dimensionamiento de la mangueta

En primer lugar, se tomaron en cuenta los desafíos y restricciones asociados al diseño de una mangueta de dirección para un vehículo FSAE eléctrico con transmisión tipo IWM.

Se inició el proceso con el análisis del espacio disponible en el sistema, específicamente alrededor del eje de la rueda, ya que la mangueta debe contar con la robustez necesaria para acoplarse adecuadamente con componentes, como la mordaza de freno y los puntos de anclaje de suspensión. No obstante, también fue fundamental considerar los límites dimensionales del diseño, con el fin de evitar roces o interferencias durante los distintos escenarios de carga a los que se somete el vehículo durante la competencia.

De este modo, se dio inicio al diseño de la mangueta, posicionando los componentes del sistema de transmisión tipo IWM, así como los demás elementos que se acoplan a ella. Estos fueron ubicados en su posición definitiva o aproximada, según la disponibilidad de sus dimensiones finales. Para ello, se utilizaron modelos geométricos genéricos de este tipo de piezas. Los principales elementos que determinan el tamaño de la mangueta en este tipo de vehículos son el tren de potencia, ya que se encuentra alojado dentro de la mangueta. De manera similar, el límite de dimensiones de la propia mangueta, y el tamaño del rin de la llanta, el cual impone un límite dimensional externo. En este trabajo, se consideró un rin de 13 pulgadas como referencia.

En función de lo descrito, la Figura 3 ilustra el espacio disponible para la mangueta (resaltado en rojo transparente) junto con algunos de los componentes a los que estará acoplada.

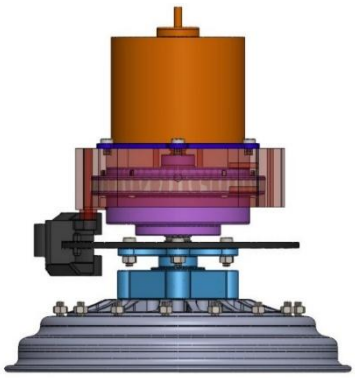


Fig. 3. Referencia de la posición de la mangueta en relación con el sistema de transmisión para el vehículo FSAE eléctrico con transmisión tipo IWM.

En dicha figura también se muestra el sistema de frenado (en negro), el motor utilizado (en naranja), el rin (en plateado), el cubo de la rueda (en azul) y el sistema de transmisión (en morado).

2.2 Generación del modelo CAD de referencia

Conociendo la ubicación de los puntos de anclaje donde se conecta la mangueta, así como las dimensiones de los componentes con los que interactúa, se realizó un diseño inicial de la mangueta que debía cumplir, al menos, con los siguientes requerimientos:

- Incluir los puntos de anclaje correspondientes al sistema de dirección y suspensión.
- No exceder las dimensiones disponibles para su diseño.
- Asegurar una correcta alineación con el eje de la rueda.
- Facilitar el proceso de ensamblaje.

En concordancia con los aspectos mencionados, se generó la geometría base de referencia para la mangueta del vehículo FSAE eléctrico con transmisión tipo IWM. La Figura 4 muestra el modelo CAD 3D propuesto.

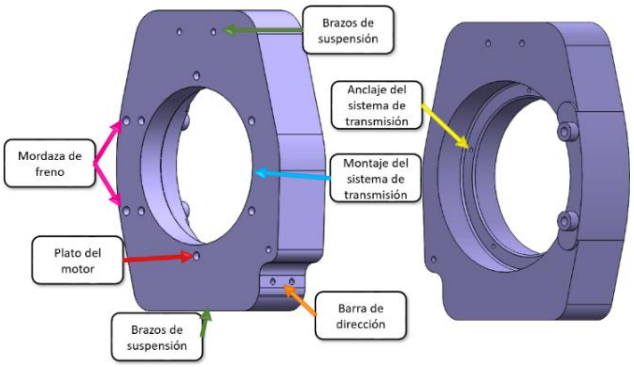


Fig. 4. Modelo CAD 3D de la mangueta en relación con el sistema de transmisión del vehículo FSAE eléctrico IWM.

Como se observa, otro factor que determinó las dimensiones finales de la mangueta fue el tamaño del sistema de transmisión. De igual manera, el espesor de la mangueta estuvo condicionado por la necesidad de acoplar otros componentes, tales como la mordaza de freno y el ensamblaje con el motor mediante un plato conector.

2.3 Determinación de condiciones iniciales de la mangueta de referencia

Con el objetivo de analizar el comportamiento de la mangueta de referencia, se definieron las condiciones de frontera y las cargas a las que estará sometida. Las cargas utilizadas fueron tomadas del trabajo realizado por Bin Amir y Xuan (2024), quienes emplearon datos provenientes de una competencia FSAE eléctrica. Basándose en estos datos, se optó por utilizar estas cargas como referencia, añadiendo cargas complementarias de acuerdo con la configuración específica del sistema de transmisión que se está evaluando. En la Figura 5, se muestran las cargas aplicadas a la mangueta del sistema de transmisión tipo IWM para un vehículo FSAE eléctrico, así como las condiciones de frontera ubicadas en los puntos de sujeción entre la mangueta y el sistema de transmisión.

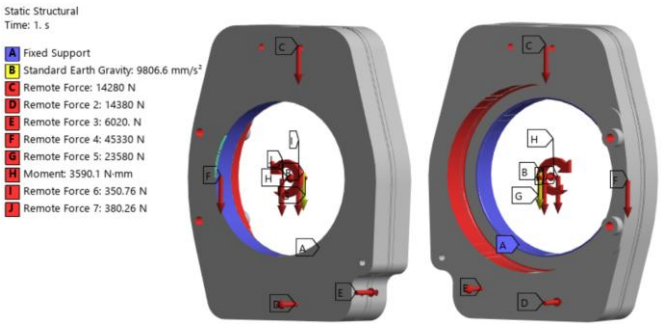


Fig. 5. Cargas actuantes en la mangueta del sistema de transmisión tipo IWM para un vehículo FSAE eléctrico.

En cuanto a la selección del material para el análisis, se eligió el Zicral, una aleación de aluminio que presenta propiedades mecánicas favorables. Estas propiedades pueden ser aprovechadas adecuadamente en el contexto de la competencia Fórmula estudiantil. Las propiedades mecánicas específicas de este material se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio Zicral.

Densidad (Kg/m^3)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Relación de Poisson
2,810	71.1	503	572	0.33

2.4 Análisis FEM

Con las condiciones iniciales definidas para la simulación mediante FEA, se empleó el software ANSYS para evaluar el comportamiento del componente. Inicialmente, se utilizó un mallado "automático", con el fin de identificar las zonas de mayor concentración de esfuerzos bajo los casos de carga establecidos

Con base en el análisis inicial de la mangueta, la mayor concentración de esfuerzos se localizó en el área de conexión con el sistema de transmisión IWM. Como respuesta a este hallazgo, se refinó la malla de manera uniforme y se utilizaron elementos hexaédricos, con el objetivo de evaluar con mayor precisión el comportamiento estructural de la mangueta. Las Figuras 6 y 7 muestran la nueva malla generada, así como el análisis de convergencia de malla realizado para determinar el tamaño adecuado del elemento.

Fig. 6. Mallado con elementos hexaédricos de la mangueta de referencia del vehículo FSAE eléctrico.

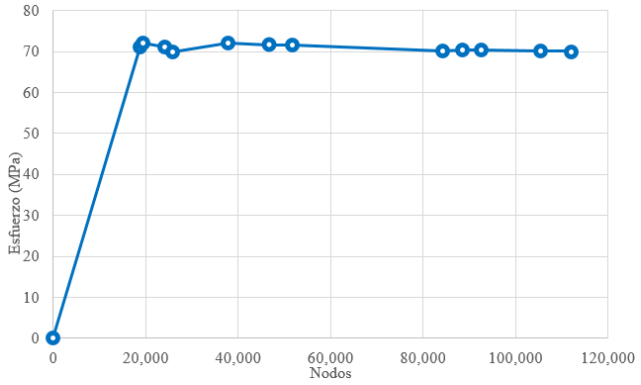


Fig. 7. Resultados del análisis de convergencia de malla aplicado a la geometría de referencia del vehículo FSAE eléctrico.

La elección de utilizar elementos hexaédricos en este estudio se fundamenta en su capacidad para ofrecer un mapeo más uniforme y preciso del comportamiento del componente. Esta característica representa una ventaja significativa al analizar la distribución de esfuerzos y deformaciones inducidas por las cargas que se generan durante la competencia. El comportamiento estructural de la mangueta con un mallado hexaédrico implementado se muestra en la Figura 8.

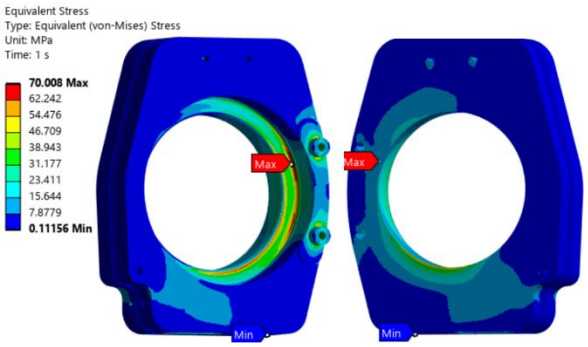


Fig. 8. Distribución de esfuerzos de von Mises en la mangueta de referencia utilizando un mallado hexaédrico.

La deformación máxima resultante fue de 0.0566 mm, mientras que el factor de seguridad alcanzó un valor de 7.18. En base con los resultados obtenidos con este mallado, se evidencia la precisión y efectividad para evaluar el comportamiento estructural de la mangueta

2.5 Optimización topológica bajo criterios definidos

Una vez establecida la malla para la simulación, se procedió a realizar la optimización de la topología. En esta etapa de la metodología, fue fundamental identificar las zonas del componente que serían sometidas al proceso de optimización, así como aquellas que quedarían excluidas. Estas áreas se representan; en la Figura 9.

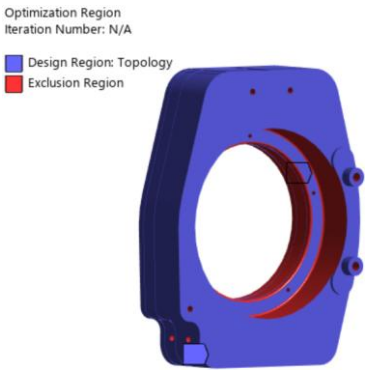


Fig. 9. Zonas de exclusión y diseño consideradas en el proceso de optimización topológica para la mangueta del vehículo FSAE eléctrico.

Una vez definidas las zonas de optimización, se estableció la función objetivo del proceso, la cual fue minimizar los esfuerzos del componente. Para ello, se impuso la restricción de que la geometría resultante conservara al menos el 50% de la masa original. El resultado obtenido se muestra en la Figura 10.

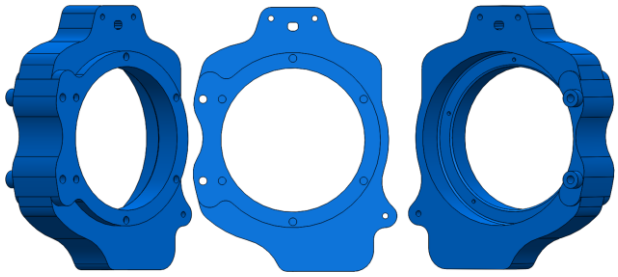


Fig.10. Geometría optimizada enfocada en minimizar los esfuerzos en la mangueta del vehículo FSAE eléctrico con transmisión tipo IWM.

La geometría resultante presenta formas sencillas y continuas, lo cual fue posible gracias a un mejor mapeo de la geometría logrado mediante el uso de los elementos hexaédricos. Aunque la calidad de la malla fue fundamental, también se aplicó un tratamiento geométrico que evitó la generación de una geometría orgánica y discontinua, la cual dificultaría tanto el análisis como la posible fabricación posterior. Por ello, el tratamiento geométrico es clave para asegurar la correcta culminación del proceso de optimización. La geometría optimizada redujo la masa a 3.18 kg, lo que representa un 39.9% respecto a la masa original de la mangueta de referencia, que era de 5.3 kg.

2.6 Evaluación de la geometría optimizada

Con el fin de verificar que las zonas de concentración de esfuerzos permanecieran en las mismas ubicaciones y cuantificar el desempeño de la optimización, se llevó a cabo una evaluación del comportamiento mediante FEA. Para este análisis, se optó nuevamente por utilizar un mallado basado en elementos hexaédricos, apoyándose en el análisis de convergencia de malla realizado previamente y considerando la eficiencia demostrada de esta técnica. Las Figuras 11 y 12 muestran el mallado generado para la mangueta optimizada y el correspondiente análisis de convergencia de malla, respectivamente.

Fig. 11. Mallado predominantemente hexaédrico de la mangueta optimizada, diseñado para minimizar los esfuerzos actuantes.

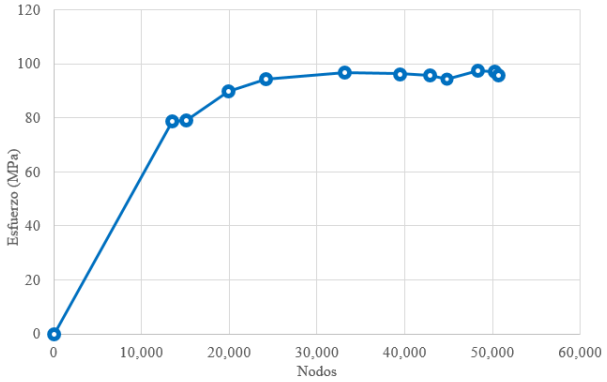


Fig. 12. Resultado del análisis de convergencia de malla aplicado a la geometría optimizada de la mangueta.

El resultado del comportamiento estructural de la geometría optimizada, diseñada para minimizar los esfuerzos, se presenta en la Figura 13.

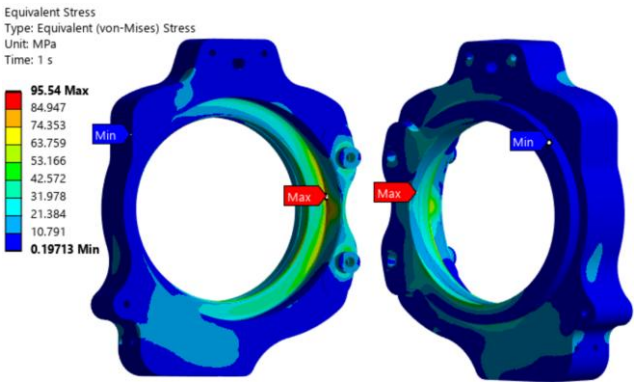


Fig. 13. Distribución de esfuerzos en la mangueta optimizada para la mangueta del vehículo FSAE eléctrico con transmisión tipo IWM.

La deformación máxima obtenida fue de 0.088 mm, mientras que el factor de seguridad alcanzó un valor de 5.26.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de resumir y comparar los resultados obtenidos, se elaboró la Tabla 2, donde se contrasta el comportamiento de la mangueta de referencia con el obtenido tras el proceso de optimización.

Tabla 2. Comparación de resultados entre la mangueta de referencia y la geometría optimizada para el vehículo FSAE eléctrico FSAE con transmisión tipo IWM.

Parámetro	Diseño de referencia	Diseño minimiza esfuerzos
% de reducción de masa	5304.6 g (NA)	3185.87 g (39.9%)
σ (MPa)	70.008	95.54
δ (mm)	0.0568	0.0886
n	7.18	5.26

Con base en los resultados obtenidos, se observó que, aunque el modelo optimizado logró una reducción significativa de su masa, aproximadamente un 40%, los niveles de esfuerzos y deformaciones aumentaron un 36.5% y un 56%, respectivamente. Sin embargo, estos incrementos son justificables según lo reportado en la literatura (Naveed *et al.*, 2022), y lo observado durante el desarrollo del trabajo, dado que las manguetas suelen estar sobredimensionadas en sus etapas iniciales para cumplir con los requisitos y condiciones de frontera.

Es importante destacar que uno de los objetivos clave en el desarrollo de componentes para la FSAE para vehículos eléctricos con transmisiones tipo IWM es reducir la masa no suspendida del vehículo; en este sentido, se logró dicho objetivo manteniendo los niveles de esfuerzos y deformaciones dentro de un intervalo adecuado de trabajo para las cargas a las que será sometido el componente.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que se cumplió con el objetivo general del proyecto, el desarrollar un componente capaz de desempeñar su función de manera eficiente, con una reducción significativa de masa sin comprometer la rigidez ni la resistencia mecánica. Además, se demostró la viabilidad del proceso propuesto para el diseño de una mangueta de dirección destinada para un vehículo FSAE eléctrico con sistema de tracción en ruedas.

Como trabajo futuro, se plantea la validación del diseño mediante su implementación en un prototipo funcional dentro de un vehículo de pruebas.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento por parte de los autores a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero brindado a través del programa de becas para estudios de posgrado, otorgada a Rene Reiyel Davila De La Peña.

REFERENCIAS

Bin Amir, M.A.H. and Xuan, K.P. (2024) 'Design optimization and analysis of steering knuckle for FSAE EV racing cars', Journal of Physics: Conference Series, 2923(1).

Bagus Hendi Prabowo, F. et al. (2022) Optimation Front Upright Racing Car Using Finite Element Analysis, The Journal of Engineering.

Carraro, E. et al. (2013) 'Formula SAE electric competition: Electrical motor design', Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).

Gautam, P. et al. (2021) 'Designing Variable Ackerman Steering Geometry for Formula Student Race Car', International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IJAEFEA), 8(1).

Liu, L., Li, J. y Tian, C. (2023) 'Steering knuckle lightweight research for additive manufacturing', Journal of Physics: Conference Series.

Naveed, A. et al. (2022) 'Structural Analysis and Topology Optimization of Steering Knuckle Using Finite Element Analysis', Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering.

Rojas Rojas, A.E., Niederkofler, H. y Hirschberg, W. (2011) 'Mechanical Design of In-Wheel Motor Driven Vehicles with Torque-Vectoring'.

Salek, F. et al. (2022) 'Energy Assessment of the Electric Powertrain System of a Formula Student Electric Race Car', SAE Technical Papers.

Santana, C. et al. (2024) 'Numerical Study of Reinforced Aluminum Composites for Steering Knuckles in Last-Mile Electric Vehicles', World Electric Vehicle Journal, 15(3), p. 109.

Shuaib, M., Haleem, A. y Kumar, L. (2019) 'Design and Analysis of Steering Knuckle Joint', Advances in Engineering Design Conference.

Wu, J., Sigmund, O. y Groen, J.P. (2021) 'Topology optimization of multi-scale structures: a review', Structural and Multidisciplinary Optimization, 63(3), pp. 1455–1480.

Wu, P. et al. (2024) 'Evaluation of the unsprung mass effect on ride comfort of in-wheel motor driving vehicles', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering.

The interface for the Smart System for Measurement and Optimization of the Charge and Discharge of Electric Vehicle Battery Packs

José de Jesús Alcalá Platas*, Omar Barragán Pérez*, Edgar Roberto Sandoval García*, Edgar Omar Curiel Anaya*.

* **TecNM-** ***Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli-. Estado de México, México CP. 54740***

(e-mail: jose.ap@cuautitlan.tecnm.mx, omar.bp@cuautitlan.tecnm.mx, edgar.sg@cuautitlan.tecnm.mx, edgar.ca@cuautitlan.tecnm.mx.).

Abstract: This research proposal seeks to develop a "Smart System for Monitoring and Optimization of an Electric Vehicle Battery." The system will incorporate advanced technologies, including artificial intelligence (AI), a Battery Management System (BMS), and developer simulator tools. It is designed to enable real-time monitoring of critical battery parameters—such as voltage, state of charge (SOC), state of health (SOH), and current—to maximize vehicle range and enhance performance. The integration of AI will deliver predictive algorithms to forecast failures and dynamically adjust energy usage based on vehicle conditions, thereby extending battery service life and improving operational efficiency. Moreover, the developed simulators will create an immersive environment for evaluating and visualizing battery behavior, supporting decision-making, and strengthening technical training. This project addresses persistent challenges in battery management by delivering an innovative solution that improves the performance, safety, and longevity of electric vehicles. It is anticipated that this research will propel electric mobility, foster environmental sustainability, and drive widespread adoption of electric vehicles by reducing reliance on fossil fuels and optimizing energy use.

Keywords*: Battery Management System (BMS), Lithium-Ion Battery, Electric Vehicle, Mobile Application, Artificial Intelligence.*

1. INTRODUCTION

The global transition toward electric mobility is heavily reliant on advancements in lithium-ion battery technology. The safety, efficiency, and longevity of these batteries are critically managed by a Battery Management System (BMS). The primary functions of the BMS are to perform cell balancing—ensuring an uniform charge and discharge across all cells in a pack—and to provide an accurate estimate of the State of Charge (SOC) to predict vehicle range.

However, many current BMS implementations, particularly in mid- to low-range electric vehicles such as scooters, bicycles, and motorcycles, suffer from significant limitations. A common issue is the reliance on SOC monitoring without incorporating real-time, cell-level voltage analysis. This often leads to poor cell balancing during discharge, resulting in an accelerated battery degradation, reduced range, and potential safety hazards such as thermal runaway [3]. Furthermore, the user interfaces in these systems are often simplistic and provide minimal actionable data to the user, which increases the risk of operational failures. In Mexico, the rapid growth of the electric micro-mobility market since 2020 has exposed various problems within the function of the BMS of the batteries. These shortcomings are frequently observed in practice, with users often reporting sudden power loss and battery failures resulting from inadequate BMS design.

This paper presents the development of an intelligent monitoring system designed to address these limitations. We propose a mobile application integrated with an AI-driven platform that performs continuous remote monitoring of lithium-ion battery packs. The core contribution of this work is a novel framework that combines a mathematical model for cell-level analysis with an AI algorithm to efficiently control and balance cell voltage during both charging and discharging. By prioritizing cell-level voltage data alongside the State of Charge (SOC), the system aims to prevent malfunctions and optimize the range of electric vehicles. The system architecture employs a combination of communication protocols (e.g., I2C, CAN) to gather data from the BMS. This data is transmitted to a progressive web application, providing users with a detailed, real-time insights into their battery's health and performance.

1.1 The Imperative for Electric Mobility and the Interface Challenge.

The global transition toward sustainable transportation is heavily reliant on advancements in electric vehicle (EV) technology—a shift that is crucial for combating climate change and reducing dependence on fossil fuels (SEMARNAT, 2022). The performance, safety, and consumer adoption of EVs are intrinsically linked to the efficiency and reliability of their energy storage systems, particularly lithium-ion batteries. However, these systems face significant challenges, including cell degradation, real-time energy management, accurate behavioral prediction, and end-of-life

handling, all of which limit their optimal performance and overall vehicle lifespan (Convertronic, n.d.; Campoverde-Pillco et al., 2024).

These challenges are particularly acute in the rapidly growing market of electric micro-mobility—such as e-scooters, e-bicycles, and e-motorcycles—especially in countries like Mexico, where adoption has surged since 2020 (Sánchez Vela et al., 2020). Users in this segment frequently report issues such as sudden power loss and premature battery failure. These problems often stem not only from inadequacies in Battery Management System (BMS) hardware but also, and perhaps more critically, from a lack of intuitive interfaces capable of effectively communicating the battery's complex status and health to the user. After all, a sophisticated BMS is futile if the user cannot understand its warnings or access the right data at the right time.

1.2 The critical role and current limitations of Battery Management Systems (BMS)

A Battery Management System (BMS) is fundamental for ensuring the safety, efficiency, and longevity of lithium-ion batteries. Its primary functions include performing cell balancing to ensure uniform charge and discharge across all cells and providing an accurate estimate of the State of Charge (SOC) to predict vehicle range (Jia et al., 2019).

Despite its importance, many current BMS implementations, particularly in mid-to-low-range vehicles, suffer from critical limitations. A prevalent issue is the over-reliance on aggregate SOC monitoring, which neglects essential real-time, cell-level voltage analysis. This deficiency often leads to poor cell balancing during operation, resulting in an accelerated battery degradation, markedly reduced range, and heightened safety hazards, including the risk of thermal runaway (Mishra et al., 2024).

1.3 State of the Art: Informing the interface Desing

The proposed interface and system design are informed by and build upon recent research focused on overcoming BMS limitations through technological innovation. Significant efforts in the field are directed towards improving real-time monitoring. For instance, Sundararajan et al. (2018) demonstrated advanced modeling and simulation techniques for BMS using Simulink. Furthermore, Li et al. (2020) and Crownhalt (2023) have explored EV battery management optimization and the potential of AI to accelerate battery research, respectively, providing the backend intelligence that our interface is designed to visualize.

Further innovations include the development of embedded systems for monitoring second-life EV batteries (Castillo-Martinez et al., 2022), which demonstrates the viability of reusing automotive-grade battery packs. Regarding critical thermal management, Liu & Li (2023) successfully employed Fiber Bragg Grating (FBG) sensors combined with machine learning to reliably estimate temperature variations, a key parameter that our interface is designed to display. A recent comparative analysis by Mishra et al. (2024) further underscores the importance of BMS by evaluating various battery technologies, while the Mexican context is specifically addressed by Sánchez Vela et al. (2020).

1.4 The BMS

Nowadays, virtually all electric vehicle battery packs incorporate a Battery Management System (BMS) to control cell voltage during charging and discharging. The absence of a BMS can pose significant safety risks to users.

2. Methodology: user-centric interface design based on dependent design principles

2.1 Methodological Application: From Theory to Interface

The transition from this philosophical framework to a tangible interface was achieved through a three-stage method:

Stage 1: Parameter Prioritization through Functional Dependency.

The initial step involved identifying the primordial parameters. This determination was not based on designer preference but was instead derived dependently from the system's primary functions—safety and optimization—and the user's fundamental need to avoid becoming stranded or endangered.

Method: A Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) was conducted on the battery pack system. Parameters that directly indicated a critical failure mode (e.g., fire from overheating, sudden shutdown from voltage imbalance, stranding due to inaccurate State of Charge) were classified as primordial.

Result: The parameters designated as primordial for display on the main screen were State of Charge (SOC): The user's primary concern for estimating range. Individual Cell Voltages: Essential for monitoring balance and predicting failures. Battery Temperature: Critical for preventing thermal runaway and ensuring safety. Current: Key to understanding real-time energy consumption and range calculation. All other data (e.g., State of Health (SOH), historical graphs) was classified as secondary and relocated to separate diagnostic screens.

Stage 2: Minimalist Layout Based on Cognitive Dependency.

The design focuses on reducing the user's cognitive load. The interface must be intuitive and instantly understandable.

Method: The "5-second rule" was applied: a user should be able to grasp the entire system status within 5 seconds. Adhering to minimalist principles, every element not serving a core function was removed. A visual hierarchy was established based on parameter priority:

State of Charge (SOC) is displayed as a large, central numerical percentage, as it is the most frequently requied data. Cell Voltage Variance is represented not only numerically but also through a clear visual indicator (e.g., a bar graph or color-coded list). This makes any imbalance immediately apparent without requiring the user to interpret complex numbers. The distribution of cells on the graph is essential for visualizing when cells remain near the nominal voltage, without correct balancing these quantitative simulations were applied and

shown in Figure 1.The other case study occurs when unbalanced cells have a significant value disparity due to damage in one or more cells as can be seen in the simulations of Figure 2. Temperature and Current are displayed with clear icons and color codes (e.g., blue/green/red for temperature) to facilitate instant comprehension of all the data shown and simulated to make an idea of the development of the smart system.

The study of anthropometrics and information visualization is crucial for designing vehicle interfaces. Viewing the State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) of the battery is a priority for the user, as these values serve as warnings regarding the vehicle's status. The Figure 3 shows the behavior of the smart system with simulated data.

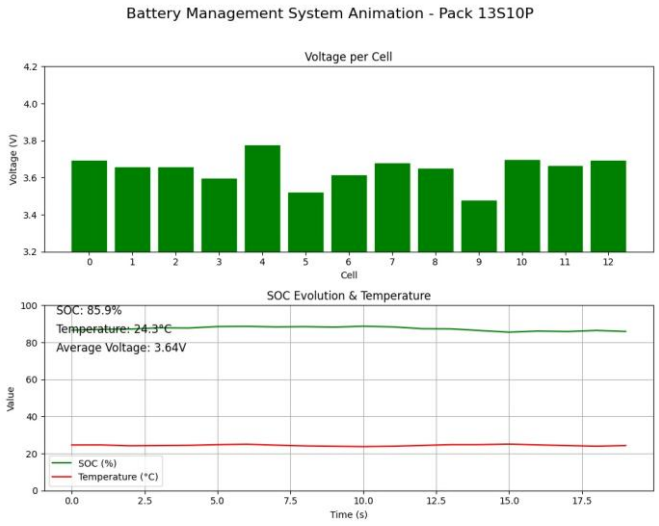


Figure 1. The models of the graphics applied of the administration of the cells when the cells aren't balanced correctly, however they are at a correct voltage because they stayed next to the level of nominal voltage.

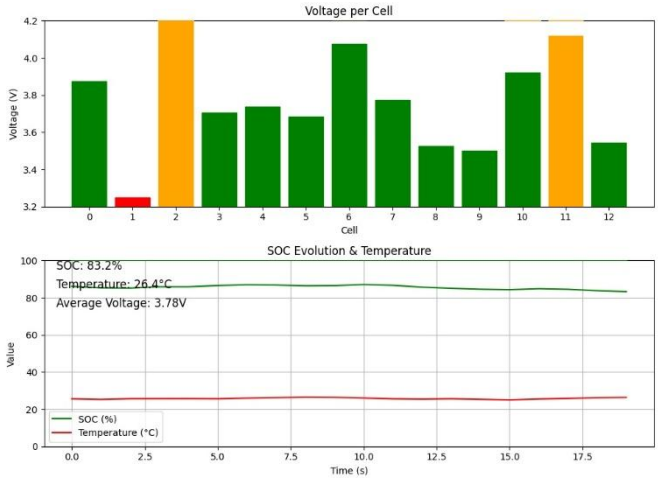


Figure 2. The graphs of the SOC and the Temperature present normal data but the graph of the voltage per cell presents a damaged cell.

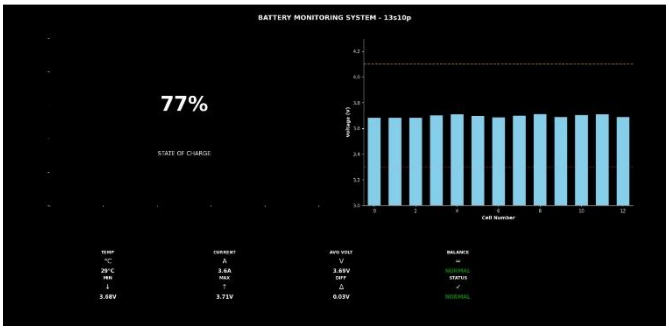


Figure 3. The vehicle interface is designed to be managed with the following layout for a 5" and 7" screen.

2.3 Designed Visual Interface Dependent on the User

The application of a user-dependent design philosophy culminates in a primary visual interface, meticulously crafted for the end-user—the electric vehicle driver. This interface is not driven by aesthetic trends but is a direct response to the user's need for simplicity, speed, and actionable information.

The main dashboard (Figure 4) embodies this principle. It presents the four essential parameters—State of Charge (SOC), Cell Voltage Variance, Battery Temperature, and Current—within a strict visual hierarchy. SOC is granted the most prominent position as a large, central numerical value, providing an immediate and unambiguous answer to the user's most critical question: "How much range do I have left?"

.

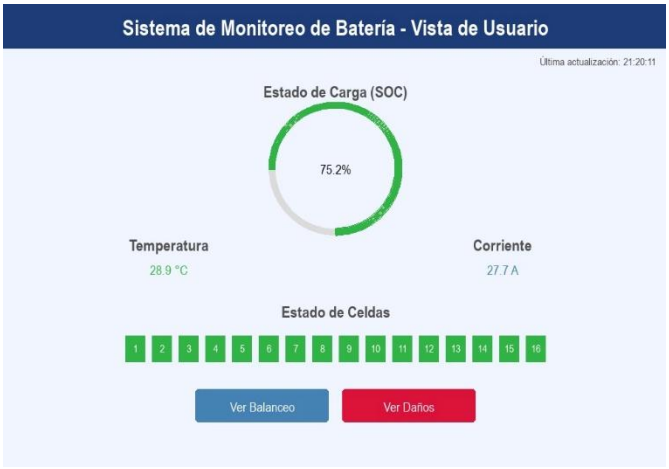


Figure 4. ***User-Centric Main Dashboard Interface***

2.4 Designed Visual Interface Dependent on Specialists for Monitoring and Maintenance

While the primary user interface prioritizes simplicity, a secondary interface is designed to address the distinct needs of specialists—such as technicians, engineers, or advanced users—for in-depth monitoring, diagnostics, and maintenance. This interface caters to their requirement for granular data, historical context, and analytical tools.

The specialist dashboard (Figure 5) provides access to the full spectrum of secondary parameters. These include detailed State of Health (SOH) metrics, historical trend graphs for

voltage, temperature, current over selectable timeframes, and error logs. The design supports the specialist's need to perform root cause analysis and prognostics.

The specialist dashboard (Figure 5) provides access to the full spectrum of secondary parameters, including:

- Detailed State of Health (SOH) metrics,
- Historical trend graphs for voltage, temperature, and current over customizable timeframes,
- And comprehensive error logs.

This design directly supports the specialist's tasks of root cause analysis and system prognostics.

The visualization of cell distribution is critical for specialists. Figure 5 demonstrates the expected state of a pack operating near its nominal voltage yet requiring balancing, indicated by a slight spread in cell values. Conversely, Figure 6 visualizes a critical failure mode, showcasing a significant voltage deviation in one or more damaged cells that appear as stark visual outliers.

These detailed visualizations provide the foundational data for the AI-driven prognostic system. They represent the specific failure modes and anomalies that the AI algorithms are trained to detect. By equipping specialists with this clear, detailed, and historic data, the interface enables proactive maintenance, validates AI-generated alerts, and facilitates informed decision-making. This ultimately fulfills the core objective of preventing accidents through expert intervention.

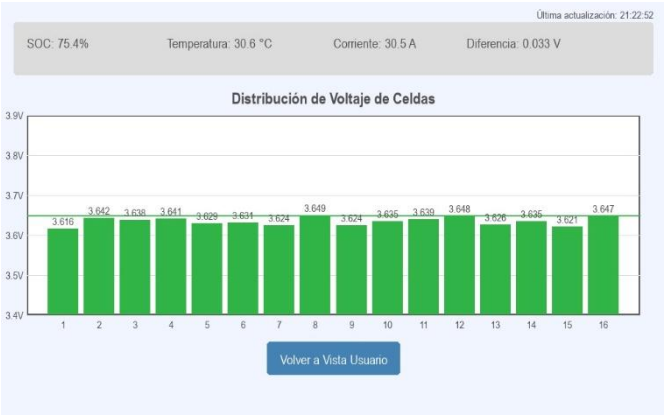


Figure 5. ***Specialist View - Cell Voltage Distribution Indicating a Damaged Cell (Specialist Interface – Damage):***

3. BALANCING ALGORITHM: MATHEMATICAL FRAMEWORK AND CONTROL LOGIC

3.1 Introduction to the cell Imbalance Problem

The fundamental challenge in managing series-connected lithium-ion battery packs is intrinsic cell-to-cell variation.

These variations, caused by manufacturing tolerances, temperature gradients, and differing aging rates, lead to imbalances in the State of Charge (SOC) and State of Health (SOH). During operation, these imbalances result in three critical issues:

Accelerated Degradation: Weaker cells are consistently over-stressed during cycling, accelerating their capacity fade and increasing their internal resistance.

Safety Risks: Severely overcharging or over-discharging an individual cell can precipitate thermal runaway.

The primary function of a Battery Management System (BMS) balancing algorithm is to mitigate these variations by redistributing energy from higher-SOC cells to lower-SOC ones. This process ensures all cells operate within a safe, narrow voltage window, thereby maximizing the pack's usable capacity and battery lifespan.

3.2 *Balancing Strategy Selection*

The system utilizes an active balancing strategy. In contrast to passive balancing (which dissipates excess energy as heat via shunt resistors), the active method transfers energy between cells, thereby enhancing overall efficiency.

3.3 *Core mathematical Model: State of Charge Estimation*

Accurate balancing requires knowledge of the individual cell's State of Charge (SOC), not just its terminal voltage. The core equation for SOC estimation is based on the Coulomb Counting method, enhanced with voltage and current measurement for calibration:

$$SOC_k(t) = SOC_k(t_0) + \left(\frac{1}{C_n}\right) * \int_{t_0}^{t} I_l(t)dt$$

Where:

$$SOC_k(t) = is\ the\ State\ of\ Charge\ of\ cell * k * at\ time\ t(in\ \%).$$

$$SOC_0(t) = is\ the\ initial\ State\ of\ Charge\ of\ cell * k.$$

$$C_n = is\ the\ nominal\ capacity\ of\ the\ cell\ (in\ Ah).$$

$$I_l(t) = is\ the\ instantaneous\ current$$

$$(positive\ for\ discharge, negative\ for\ charge).$$

This estimation is continuously corrected using a measured open-circuit voltage (OCV) lookup table specific to cell chemistry to compensate for cumulative current sensor error and drift.

3.4 *The Balancing Control Law*

The balancing algorithm is triggered based on a divergence of the metric. The most common metric is the range of SOC across all cells in the pack:

$$\Delta soc = \max(SOC_1 + SOC_2 + SOC_3 + \cdots SOC_n)$$

$$-\min\ (SOC_1 + SOC_2 + SOC_3 + \cdots SOC_n)$$

A balancing operation is initiated when ΔSOC exceeds a predefined threshold (e.g., 2-5%). The control logic for each cell k is then:

$$Balance\ cell\ (k) = \{ON, if\ SOC_k > (SOC_{AVG} + \Delta SOC_{TH})\ OFF, otherwise\}$$

Where:

SOC_{AVG} is the average SOC of all cells in the pack. This ensures only the cells with a SOC significantly above the average are discharged (energy transferred away).SOC_{TH} is a pre-defined, numerical value that acts as the system's "trigger" or "on/off switch" for the balancing process. It is the minimum acceptable difference in State of Charge. The SOC Threshold works the exact same way for a battery management system (BMS). This threshold represents the difference in State of Charge (SOC) between the highest and lowest cell in the battery pack that triggers an intervention. Think of it like a household thermostat: You set the desired temperature to 22°C. The heater doesn't activate the moment the temperature drops to 21.9°C. Instead, it waits until it falls to a lower threshold, say 20°C, before turning on. Here, 22°C is the target, and 20°C is the action threshold. The 2°C difference is the "deadband" buffer that prevents the heater from short cycling for minor, insignificant fluctuations. The SOC threshold in a Battery Management System (BMS) operates precisely on the same principle.

4. SYSTEM BLOCK ARCHITECTURE FOR INTERFACE IMPLEMENTATION.

This section details the multi-layered hardware and software architecture of the proposed intelligent monitoring interface, which encompasses data acquisition, processing, cloud communication, and user presentation.

The overall architecture is illustrated in Figure 6 (Hardware Layer), Figure 9 (Processing Unit), and Figure 8 (Protection Circuitry).

Figure 6. ***Hardware Layer: Data Acquisition Module: Battery Management.***

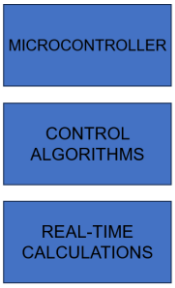


Figure 7. ***Processing unit section.***

Figure 8. ***The protection Circuitry section.***

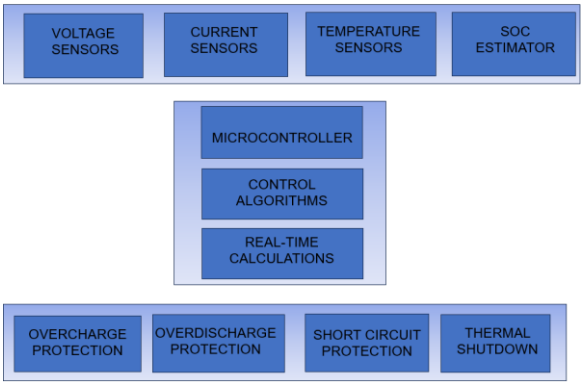


Figure 9. ***The complete block diagram with the three sections.***

4.1 Data Flow Integration

The system's operation can be traced through a complete data flow cycle:

- Acquisition: The BMS IC measures cell voltages, current, and temperature.
- Processing: The MCU reads this data, runs estimations (SOC, SOH), and packages it into a JSON payload.
- Transmission: The wireless module sends this payload securely (e.g., via MQTT or HTTPS) to the Cloud Gateway.
- Storage & Analysis: The cloud server stores the data in a time-series database and executes AI models if triggered.
- Presentation: The user opens the PWA. The app authenticates the user, fetches the latest data and historical trends via an API, and establishes a WebSocket connection for live updates. Action: The user views the information. In the specialist view, they might send a command (e.g., "Initiate Balance"), which flows back through the system.

5. CONCLUSIONS

This paper presented the design and development of an Intelligent Monitoring Interface for a smart system dedicated to optimizing electric vehicle (EV) battery packs. Moving beyond the limitations of current Battery Management Systems (BMS)which often provide minimal, non-actionable data through simplistic interfaces, this work proposes a novel, user-centric framework grounded in the principles of dependent design.

The core contribution of this research is a dual-interface system that caters to the distinct needs of different users. For the everyday driver, a minimalist, glanceable dashboard was designed to prioritize essential parameters like State of Charge (SOC), cell voltage variance, temperature, and current. This interface is focused on reducing cognitive load and providing immediate, actionable insights to enhance safety and range awareness. For specialists, a comprehensive diagnostic interface was developed to offer granular, real-time data visualization, historical trend analysis, and tools for advanced prognostics. This design is focused on enabling deep analysis and informed decision-making for maintenance and failure prevention.

In conclusion, this project successfully demonstrates that a well-designed interface is not merely a display but a critical component of the BMS itself. By making complex battery data accessible, intuitive, and actionable, the proposed system directly addresses prevalent issues such as battery degradation, sudden failure, and range anxiety—key factors that hinder the adoption of electric micro-mobility, particularly in emerging markets like Mexico.

The following avenues are proposed for future work:

- Real-World Validation: Conduct large-scale field trials to gather empirical data on the system's impact on battery lifespan, user behavior, and failure prevention rates.
- AI Model Enhancement: Integrate more sophisticated machine learning models for predictive maintenance. These models would be capable of forecasting individual cell failure and State of Health (SOH) degradation with higher accuracy.
- Interface Personalization: Develop adaptive interface elements that learn from user habits and preferences to further customize the flow of information.

REFERENCES

Campoverde-Pillco, J., Ochoa-Correa, D., Villa-Ávila, E. and Astudillo-Salinas, P. (2024). Reutilización de baterías de vehículos eléctricos para aplicaciones de segunda vida en sistemas eléctricos de potencia con una alta penetración de energía renovable: una revisión sistemática de la literatura. Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología, (31), pp. 95-105. Disponible en: https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.08.

Convertronic (n.d.). Guía para ingenieros sobre sistemas de gestión de baterías de vehículos eléctricos. [online] Disponible en: https://convertronic.net/semiconductores/diseno-2/11903-guia-para-ingenieros-sobre-sistemas-de-gestion-de-baterias-de-vehiculos-electricos.html [Consultado 26 Nov. 2024].

Crownhalt, C. (2023). Cómo la IA podría impulsar la investigación sobre baterías. MIT Technology Review. [online] 15 Jun. Disponible en: https://www.technologyreview.es/s/15837/como-la-ia-podria-impulsar-la-investigacion-sobre-baterias [Consultado 26 Nov. 2024].

García Guzmán, F. (2018). Diseño independiente vs. diseño dependiente: Una metodología para el diseño de interfaces de usuario. [online] Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Disponible en: http://espartaco.azc.uam.mx/UAM/211175/files/assets/common/downloads/publication.pdf [Consultado 26 Nov. 2024].

Hernández, L., Sáenz, J.P. and Ottersten, B. (2022). A review of battery state of charge estimation methods. [online] KTH Royal Institute of Technology. Disponible en: https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1802829/FULLTEXT01.pdf [Consultado 26 Nov. 2024].

Huang, W., Abulaitijiang, A. and Liu, O. (2021). State of charge estimation for lithium-ion battery based on an intelligent adaptive fractional-order extended Kalman filter with improved whale optimization algorithm. Journal of Energy Storage, 44(Part B), p. 103295. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103295.

Jia, Y., Li, J. and Liu, F. (2019). Optimal state-of-charge estimation for battery management systems in electric vehicles: A robust modeling and control framework. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(8), pp. 6546–6555. Disponible en: https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2941132
Koch, D. and Schweiger, H.-G. (2022). Possibilities for a quick onsite safety-state assessment of stand-alone lithium-ion batteries. Batteries, 8(11), p. 213. Disponible en: https://doi.org/10.3390/batteries8110213.

Li, L., Wang, X., Zhang, L. and Zhang, Z. (2020). Optimization of electric vehicle battery management using deep learning techniques: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, 277, p. 123127. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123127.

Limon, R. (2024). Una técnica desarrollada por un profesor español desvela lo invisible. El País. [online] 8 Oct. Disponible en: https://elpais.com/tecnologia/2024-10-08/una-tecnica-desarrollada-por-un-profesor-espanol-desvela-lo-invisible.html [Consultado 26 Nov. 2024].

Liu, S. and Li, K. (2023). Thermal monitoring of lithium-ion batteries based on machine learning and fibre Bragg grating sensors. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 45(7), pp. 1370–1380. Disponible en: https://doi.org/10.1177/01423312221143776.

Mishra, H., Tripathi, A.K., Sharma, A.K. and Sree Laxshmi, G. (2024). Evaluating energy storage technologies for electric vehicles: A comparative analysis and battery management system overview. E3S Web of Conferences, 472, p. 01020. Disponible en: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447201020.

Sánchez Vela, L.G., Fabela Gallegos, M. de J., Hernández Jiménez, J.R., Flores Centeno, O., Vázquez Vega, D. and Cruz Acevedo, M.E. (2020). Estado del arte de la movilidad eléctrica en México. [online] Instituto Mexicano del Transporte. Disponible en: https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt596.pdf [Consultado 26 Nov. 2024].

SEMARNAT (2022). Contribución Determinada a nivel Nacional. Actualización 2022. [online] Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/MEX_NDC1_2022.pdf [Consultado 26 Nov. 2024].

Sundararajan, V., Sharma, A. and Zhao, W. (2018). Modeling and simulation of battery management systems for electric vehicles using Simulink. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67(5), pp. 3720–3731. Disponible en: https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2791563

Design of an Automated Intelligent Irrigation System for a Persian Lime Agricultural Field.

Osorio Sánchez, Yutzil *, Bautista Bautista, Alberto N. *, Ávila Martínez, Carlos E.*, García Enríquez, Irma J.*, Galván Chávez, Jorge M.*, Navarrete Hernández, Gabriel A.*

** Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, 94910.*
(e-mail: {20233i101003, alberto.bautista, carlos.avila, irma.garcia, jorge.galvan, gabriel.navarrete}@utcv.edu.mx).

Abstract The following work presents the design, implementation, and validation of an automated drip irrigation system over 20 hectares of Persian lime crops in Cuitlahuac, Veracruz. The identified problem was the low efficiency in water use in manual systems, which causes waste, uneven distribution, and lack of control. To solve this, programmable controllers, moisture sensors, digital flow meters, an HMI interface, and hydraulic components were integrated to optimize efficiency, uniformity, and sustainability in irrigation. The research, of applied type and quantitative approach, evaluated application efficiency, irrigation uniformity, water and energy consumption, as well as operational performance. Three modalities were compared: manual irrigation, semi-automated irrigation, and intelligent automated irrigation, using exclusively quantitative techniques with moisture sensors, flow meters, and thermo-hygrometers. The results show significant improvements, soil volumetric moisture increased from 26% to 33%, reducing water stress and favoring root nutrition. Application efficiency increased from 72.9% to 90%, while irrigation uniformity improved from 80% to 92%, ensuring a more homogeneous water distribution. Specific water consumption decreased by 15.3% (from 8.50 to 7.20 m³/ha per cycle), and energy consumption dropped by 25%, which implies economic savings and operational sustainability. The tests confirmed the integrity of the hydraulic network and the safety of thermal conditions, although it was recommended to protect the main pipeline from solar radiation. With response times under 0.5 s and reliable records stored in the database, the system demonstrated robustness and technical feasibility. Automated drip irrigation offers verifiable benefits in water, energy, and uniformity efficiency, consolidating its potential for replication in other crops.

Keywords: Automated irrigation, Efficiency, Sensors, Sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del agua en la agricultura es uno de los principales retos frente al cambio climático, la escasez hídrica y la necesidad de sostenibilidad en los sistemas productivos. En lugares como Cuitláhuac, Veracruz, el cultivo de limón persa constituye un eje estratégico de la economía local, lo que hace indispensable optimizar el riego para elevar la productividad y, al mismo tiempo, conservar los recursos naturales.

El riego agrícola, aunque esencial para la producción mundial de alimentos, suele ser ineficiente cuando se gestiona de forma manual o semiautomatizada. Esto ocasiona un uso excesivo de agua, falta de control en la distribución hídrica y un aprovechamiento deficiente de la energía, lo que repercute negativamente en lo ambiental y en lo económico. El desperdicio de agua eleva costos operativos, genera erosión de suelos, lixiviación de nutrientes y contaminación de cuerpos de agua.

La incorporación de la mecatrónica en la agricultura ha revolucionado la manera de gestionar el riego. Al integrar mecánica, electrónica, informática y control, permite desarrollar sistemas inteligentes que ajustan la cantidad de agua según las necesidades del cultivo y las condiciones ambientales. Sensores, actuadores y algoritmos de control, combinados con inteligencia artificial, han hecho posible la automatización predictiva, reduciendo el consumo hídrico y mejorando la productividad sin comprometer la sostenibilidad.

En este contexto, diversos estudios han demostrado la relevancia de aplicar tecnologías modernas al cultivo del limón persa.

En un primer trabajo se evaluaron dos tratamientos de riego en plántulas de limón persa, concluyendo que un mayor volumen de agua no necesariamente mejora el desarrollo morfológico. Se destaca la importancia de ajustar el riego a las necesidades reales del cultivo (Barrera, 2024).

En Misantla se diseñó un sistema que combina agua de humedales tratados con fuentes naturales. Se redujo en 40 % la pérdida de agua respecto al riego manual y se observó un incremento del 15 % en parámetros de crecimiento de las plantas. Se recomendó mejorar los filtros para evitar microplásticos (González, 2023).

Un sistema analizado con anterioridad no contemplaba la heterogeneidad del suelo, generando desperdicio de agua en algunas áreas y déficit en otras. El rediseño, basado en análisis texturales e infiltración, permitió una distribución más uniforme y eficiente, además de reducir costos y asegurar la sostenibilidad del cultivo (Gramajo, 2021).

En conjunto, estos casos muestran que el cultivo de limón persa requiere un manejo preciso del agua, ya que la calidad y rendimiento dependen de una distribución adecuada. Los sistemas manuales de riego por goteo continúan representando una limitación, pues generan un uso ineficiente de agua y energía, elevando costos y comprometiendo la sostenibilidad ambiental.

La implementación de tecnologías mecatrónicas no solo responde a la urgencia de enfrentar el cambio climático y la escasez hídrica, sino que también ofrece beneficios económicos y sociales. Estos sistemas permiten a los agricultores optimizar el recurso hídrico, mejorar su competitividad en mercados internacionales y contribuir a la seguridad alimentaria.

La optimización del riego, basada en innovación tecnológica y buenas prácticas, constituye un factor decisivo para lograr un cultivo de limón persa más rentable, resiliente y ambientalmente sostenible.

2. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolló para una superficie de 20 hectáreas cultivadas con limón persa, con una red de 24 sensores y 4 zonas de riego, ubicado en la región de Cuitláhuac, Veracruz. El tiempo de construcción del proyecto fue de 4 meses, incluyendo diseño, construcción y pruebas de funcionamiento.

El diseño del sistema automatizado de riego inteligente se estructuró en cuatro fases: preparación del sitio, instalación de infraestructura hidráulica, integración de hardware de control, y validación experimental.

2.1 Materiales y equipos

Se emplearon los siguientes dispositivos industriales:

- PLC Amsamotion AMX-200 CPU224XP
- HMI Kinco GL070E
- Sensores de humedad Decagon 5TM,
- Caudalímetro GPI F618
- Electroválvulas Toro de 24 VDC

2.2 Procedimiento de implementación

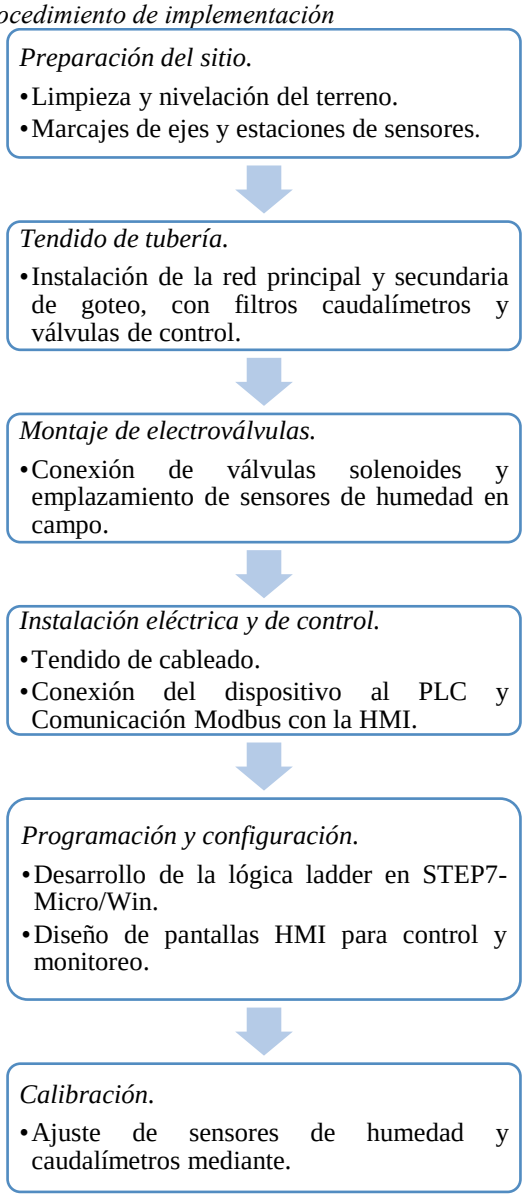


Fig. 1. Diagrama a bloques de la metodología

2.3 Instalación de sensores y cableado

Los sensores de humedad Decagon 5TM fueron emplazados a una profundidad de 20 cm en el punto medio de cada estación de monitoreo, garantizando contacto directo con el sustrato radicular. Desde cada sensor se tendió cable multicore 4×0.75

mm² hacia el armario de control, asegurando la transmisión de señales analógicas. Para la alimentación y control de las electroválvulas se utilizó cableado multicore 6×1.5 mm², instalado en canaletas desde los colectores hidráulicos hasta el PLC. Por último, se realizó la conexión a tierra y la puesta a tierra común del armario de control, cumpliendo con las normas de seguridad eléctrica aplicables (*Figura 2)*.

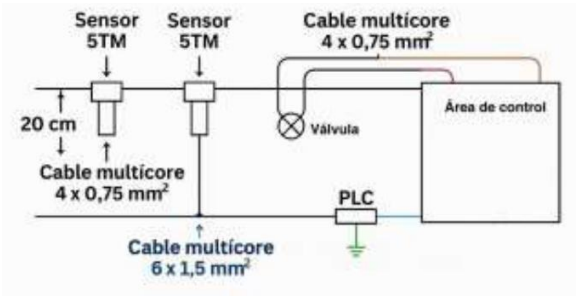


Fig. 2. Diagrama de instalación de sensores y cableado

2.4 Programación y configuración del PLC/HMI

La programación del sistema de control inició con la importación de la configuración de entradas y salidas en el software STEP7-Micro/Win, donde se asignaron las señales analógicas provenientes de los sensores de humedad y caudal, así como las salidas digitales destinadas a la activación de electroválvulas. La lógica general del algoritmo se esquematizó en un diagrama de flujo que describe la secuencia de lectura de variables, toma de decisiones y generación de alarmas (*Figura 3*).

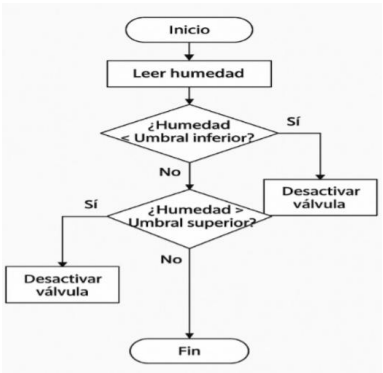


Fig. 3. Diagrama de flujo del algoritmo de riego

Una vez definido el algoritmo, se procedió a su codificación en lenguaje ladder. En este programa se configuraron rutinas de lectura periódica de los sensores, comparando el valor de humedad con los umbrales programados. Cuando la humedad del suelo descendía por debajo del límite inferior, el PLC activaba la válvula correspondiente, mientras que, si superaba el umbral superior, la cerraba. De igual manera, se establecieron condiciones de seguridad para activar alarmas ante caudales anómalos o fallos de sensores. El detalle de esta lógica puede observarse en el diagrama de escalera implementado (*Figura 4*).

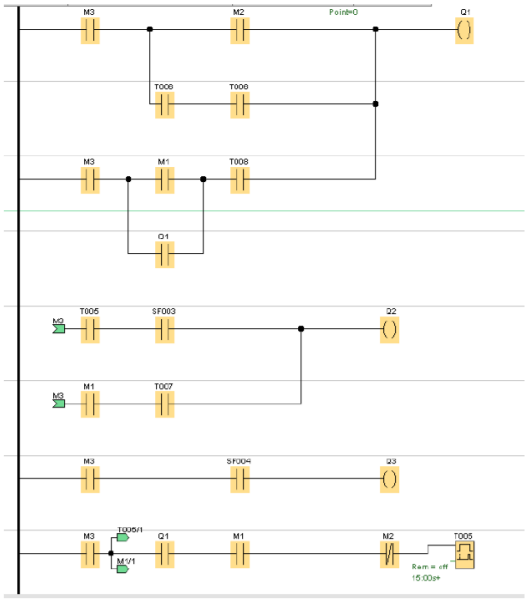


Fig. 4. Fragmento de lógica en diagrama de escalera

La integración del sistema requirió el mapeo de entradas y salidas del PLC hacia los sensores, actuadores y la interfaz HMI. A continuación, se resumen las conexiones principales utilizadas para la implementación del sistema automatizado de riego.

Tabla 1. Mapeo de conexiones del PLC con sensores, electroválvulas y HMI

Subsistema	Conexión	Descripción
PLC – Sensores de humedad y caudalímetro	AIW0 a AIW78	Entradas analógicas de sensores Decagon 5TM (0–10 V)
	I1.0 a I1.9	Entradas digitales para pulsos de caudalímetros GPI
	GND PLC	Tierra común de sensores
	+24 VDC	Alimentación de sensores desde fuente del PLC
PLC – Electroválvulas	Q0.0 a Q0.9	Salidas digitales (transistor) para válvulas Toro 24 VDC
	GND PLC	Retorno común de válvulas
	Contactores intermedios	Protección cuando la carga supera la capacidad del PLC
PLC – Interfaz HMI (Kinco GL070E)	RS-485	Comunicación Modbus RTU (puerto DB9)
	Dirección esclava: 1	Configuración de nodo de comunicación

En paralelo, se diseñaron las pantallas de supervisión HMI en el software Kinco HMIware. Estas pantallas integraron un monitor en tiempo real de variables (humedad, caudal y estado

de válvulas), opciones de control manual para cada estación y un módulo de registro automático en tarjeta SD, destinado a la bitácora del sistema.

En el diseño de la interfaz HMI se organizaron las funciones principales en tres pantallas. La pantalla de inicio presenta la bienvenida al sistema (*véase Figura 5*), lo que permite al operador navegar de manera sencilla.

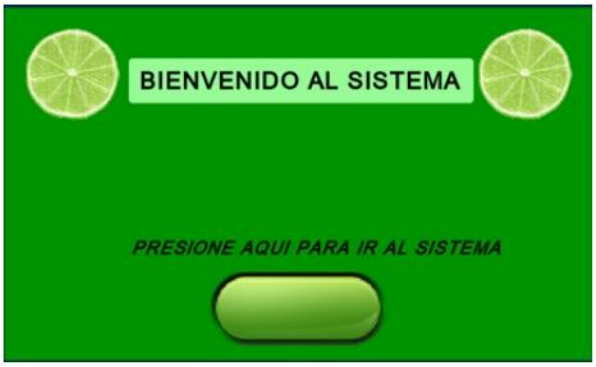


Fig. 5. Pantalla de inicio de la HMI

Posteriormente, se desarrolló una pantalla específica para el estado de activación de las válvulas, en la cual el usuario puede observar en tiempo real qué estaciones de riego se encuentran en operación y, de ser necesario, realizar la activación o desactivación manual de cada válvula (*Figura 6*).

Fig. 6. Estado de activación de válvulas en tiempo real

Finalmente, se implementó la pantalla de registro de datos en SQLite, destinada al almacenamiento de lecturas históricas de humedad, caudal y eventos del sistema. Esta interfaz facilita el análisis posterior de desempeño y la generación de reportes, como se muestra en la Figura 7.

Fig. 7. Registro de datos en base SQLite

2.5 Gestión de riesgos y cumplimiento normativo

Se aplicaron medidas de seguridad conforme a NOM-001-SEDE, NOM-026-STPS, NOM-001-CONAGUA y normas internacionales OSHA, priorizando la seguridad eléctrica, mecánica e hidráulica en la instalación y operación del sistema de riego. En la Tabla 2 se presentan las disposiciones más importantes que abarcan señalización de áreas, uso de EPP, bloqueo y etiquetado de equipos, así como verificaciones previas de presión y purga de tuberías.

Tabla 2. Medidas preventivas y normatividad aplicable en el sistema de riego automatizado

Medida preventiva	Norma aplicable
Señalización de zonas de trabajo con cintas, conos o barreras	NOM-026-STPS-2008
Uso de equipo de protección personal (casco, guantes dieléctricos y de corte, botas, gafas, careta)	NOM-017-STPS-2008 / NOM-115-STPS-2009 / NOM-113-STPS-1994 / NMX-S-003/1-SCFI-2006 / NMX-S-041-1987
Procedimiento de bloqueo y etiquetado (Lockout–Tagout)	OSHA 29 CFR 1910.147
Desconexión de alimentación general antes de labores	NOM-001-SEDE-2012
Colocación de candados y etiquetas en interruptores y fusibles	OSHA 29 CFR 1910.147
Verificación con multímetro previo a trabajos eléctricos	NOM-001-SEDE-2012
Verificación de presión hidráulica antes de energizar la bomba	NOM-001-CONAGUA-2011
Asegurar válvulas en posición cerrada	NOM-001-CONAGUA-2011
Apertura lenta de válvulas para purgar aire	NOM-001-CONAGUA-2011

Finalmente, la figura 8 muestra el sistema de riego automatizado, evidenciando la interconexión de sensores, actuadores y controladores que permiten la distribución eficiente del agua, optimizando el consumo y asegurando el riego uniforme de los cultivos

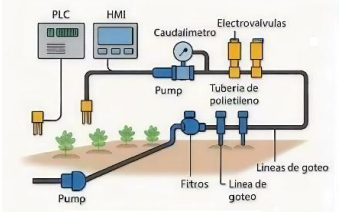


Fig. 8. Sistema de riego automatizado.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Esta tabla compara el contenido volumétrico de agua en el suelo antes del riego automatizado (manual) y el valor que se alcanzó con el sistema de goteo inteligente, realizando 30 pruebas, para obtener un promedio de humedad.

Tabla 1. Humedad del suelo

Subzona	Manual (% vol.)	Incremento (%)
1	26%	26.9%
2	26%	26.9%
3	26%	26.9%
4	26%	26.9%
Promedio	26%	26.9%

La reducción del 25 % en tiempo de operación se traduce directamente en ahorro energético, al disminuir 5.5 KWh por ciclo. Al año, esto equivale a un ahorro de 55 KWh, lo que representa 192.50 MXN menos en facturación eléctrica.

Tabla 2. Comparación de EA entre métodos

modo	Potencia bomba (KWh)	Tiempo operación (h/ciclo)	Consumo (KWh/ciclo)	Consumo (KWh/ha *ciclo)	Ahorro (%)
Manual convencional	5.5	4	22	1.1	-
automatizado	5.5	3	16.5	0.83	25

La eficiencia de aplicación (EA) mide qué proporción del agua suministrada es realmente útil.

- Si EA < 85 %, se evalúan pérdidas por percolación (filtrado excesivo) o evaporación (rango horario), que exista un índice del 90% está en un porcentaje bueno.
- Ajuste de presión en válvulas solenoides (1.2 bar) y frecuencia de riego (ciclos cortos frecuentes) para maximizar EA.

Tabla 3. Distribución de volúmenes

Modo	Agua útil aplicada (m^3)	Agua total suministrada (m^3)	EA (%)
Manual	1020	1400	72.9
Automatizado	1170	1300	90
Incremento	-	-	23.4

Los resultados numéricos muestran que el sistema de riego automatizado incrementa la humedad volumétrica del suelo de 26% a 26.9%, reduce el consumo energético por ciclo en un 25% y mejora la eficiencia de aplicación de agua del 72.9% al 90%, lo que indica una mayor disponibilidad hídrica para las plantas y un uso mucho más eficiente del recurso. Debido a que el tamaño de muestra empleado corresponde a un estudio piloto (n=4), estos resultados deben solamente considerarse como indicativos de una tendencia positiva. Basándose en el cálculo estadístico de tamaño de muestra, se requerirían aproximadamente 22 observaciones por muestreo para validar con significancia estadística las mejoras observadas, recomendándose ampliar el muestreo en futuras etapas del estudio. Al revisar un trabajo previo de crecimiento de hortalizas (Chúga, 2022) demuestras que un sistema automático mejora el crecimiento de los cultivos, adicionalmente, (Jaramillo, 2023) menciona que un sistema de riego similar puede reducir significantemente el crecimiento de maleza, derivado a se recomienda comparar científicamente dos parcelas paralelas (control manual vs. automatizado) para analizar las mejoras que los documentos previos mencionan.:

- Rendimiento productivo (Kg de fruta/ha).
- Índices de estrés hídrico.
- Calidad de fruto (nivel de sólidos solubles, acidez).
- Crecimiento radicular y biomasa. Estos datos permitirán cuantificar mejoras reales y ajustar la programación de riego.

Será necesario instalar un sistema de monitoreo continuo de caudales y niveles freáticos para asegurar que la fuente de agua (pozo, bordo o red de riego) mantenga la capacidad requerida en todo momento al Incorporar sensores de nivel y flujo con telemetría.
La arquitectura del sistema facilita su adaptación a papaya, piña, naranja u otros cultivos con requerimientos distintos. Para ello se deberá recalibrar umbrales de humedad y tiempos de riego según la evapotranspiración específica, ajustar diámetro de tuberías y caudal de goteros a la densidad de planta, validar uniformidad y eficiencia en cada nuevo cultivo mediante pruebas piloto, diseñar manuales de configuración modular que agilicen la puesta en marcha. El uso de un inversor híbrido que prioriza la energía solar con baterías de litio a 48 V/100 Ah para 2 días de autonomía con conmutación a red eléctrica si la batería baja del 20 % incluyendo la verificación de válvulas: trimestral, inspeccionar sellos y solenoides.

La literatura actual sobre sistemas inteligentes de riego y los estudios agronómicos sobre el limón persa permiten una base sólida para definir umbrales de humedad, necesidades hídricas y estrategias de control automatizado; mientras que trabajos mexicanos aplicados, como el diseño e implementación de un sistema de riego con IoT y cálculo de evapotranspiración de referencia en un entorno controlado (Velásquez Mora, 2024), proporcionan evidencia práctica sobre la viabilidad técnica y operativa de este tipo de soluciones utilizando hardware accesible. Esta información fortalece el diseño de sistemas automatizados de riego, debido a que combina fundamentos teóricos y parámetros agronómicos con experiencias reales de implementación. También cabe mencionar que persisten limitaciones relacionadas con la adaptación de prototipos desarrollados en invernadero hacia huertos a cielo abierto, donde la variabilidad climática y de suelo demanda calibraciones adicionales.

4. CONCLUSIONES

La humedad volumétrica del suelo mostró un incremento en hidratación radicular. Este aumento no solo reduce el estrés hídrico de las raíces, sino que favorece una mayor actividad

microbiana y un mejor intercambio de nutrientes en la zona radicular sientan un precedente alentador para la validación en campo, donde las texturas y heterogeneidades del suelo podrían atenuar o potenciar la ganancia de humedad.

En términos de eficiencia de aplicación en el sistema automatizado, así como el consumo específico de agua por hectárea, indica una disminución notable de las pérdidas por escorrentía, percolación profunda y evaporación superficial. Esta optimización asegura que la mayor parte del agua suministrada sea aprovechada por el cultivo, traduciéndose en un uso más responsable del recurso hídrico. Asimismo, la uniformidad de riego (CU) mejoró, lo cual confirma que la distribución de agua entre los emisores es mucho más homogénea y que prácticamente todas las plantas reciben un aporte muy cercano al promedio diseñado. Estos resultados consolidan la sostenibilidad económico-energética del sistema.

REFERENCIAS

Barrera Rivera, F.L. (2024) Diseño e implementación de un sistema de riego por microaspersión para cultivo de limón persa (Citrus latifolia), en el proyecto Santiago, Monjas, Jalapa, Guatemala. Licenciatura en Ciencias Agrícolas con Énfasis en Riegos tesis. Universidad Rafael Landívar.

Chugá Rosero, M. A. (2022) Diseño e Implementación de un Sistema de Riego Inteligente y Monitoreo de Variables Edafológicas y Meteorológicas Activado por IoT. Trabajo de fin de carrera. Universidad Internacional SEK sede Quito.

González et al., 2023. Sistemas de Riego por goteo con Aguas Tratadas en cultivos de Limón Persa (Citrus Latifolia Tanaka): riesgos por microplásticos. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad (TERYS)*, 2, pp.24 -25.

Gramajo Mejía, D.A. (2021) Rediseño de riego, para el cultivo de Citrus x latifolia T., Rutaceae “Limón Persa” en Finca Panamá, Agropecuaria Atitlán S.A. Santa Bárbara, Suchitepéquez. Ingeniería en Agronomía Tropical thesis. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Jaramillo Chamba, D.A. (2023). Sistema de riego inteligente para el mantenimiento de áreas verdes en una institución educativa. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 10(2), pp. 50-63.

Velásquez Mora, I. D. (2024) *Aplicando el Internet de las Cosas para la implementación de un modelo de evapotranspiración en cultivos bajo condiciones protegidas*. Tesis de Maestría. Tecnológico Nacional de México – Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.

Embedded System for Automatic Monitoring of Water TDS Using a Microcontroller and Graphical User Interface

Sánchez Coronado Eduardo-Mael *, Rodríguez Jarquin José Pastor, Bertani Hernández David, León Reyes Arnulfo, García Puga Cecilia-Elizabeth, Pimentel Suvilla Eduardo**

** TecNM/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9 no. 852 Colonia Emiliano Zapata, Veracruz, México, cp. 94320*

***Programa Especialidad en Semiconductores del TecNM/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9 no. 852 Colonia Emiliano Zapata, Veracruz, México, cp. 94320*
eduardo.sc@orizaba.tecnm.mx

Abstract: This work presents the design and implementation of an embedded system for the automatic monitoring of the total dissolved solids (TDS) content in water, based on the ESP32 microcontroller and an analog TDS sensor. The system incorporates a graphical interface that enables real-time online supervision. The signal acquisition, conditioning, and processing stages were implemented within the microcontroller. Additionally, a physical module was designed using CAD modeling tools, allowing the integration of electronic and display components into a compact, practical, and adaptable structure suitable for various application environments. Experimental results showed a low percentage of dispersion in the measurements, confirming the reliability and repeatability of the proposed system. Overall, the developed solution represents an efficient and low-cost alternative for continuous water quality monitoring in productive processes or environments where TDS determination is required.

Keywords: Monitoring, Embedded, Measurement, Water, Microcontroller

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de sistemas de monitoreo automático de variables fisicoquímicas, en específico, del Total de Sólidos Disueltos (TDS) en sistemas de producción es considerado como una actividad crítica [Abdelhady et al. (2023)], dichos sistemas tienen la encomienda de ejecutar la supervisión de variables en línea para asegurar la evolución nominal del proceso. La medición del TDS en agua es de suma importancia para algunos procesos productivos, por ejemplo, en instalaciones de tratamiento de agua [Vijayakumar et al. (2024)], en calderas [Zhao et al. (2023)], así mismo, en sistemas de refrigeración [Abbas et al. (2021)] e incluso en la producción de alimentos involucrando procesos de cultivo y producción de especies vegetales [Hidayatullah et al. (2022), Raj et al. (2023)]. A través de la medición del TDS es posible realizar la detección tanto de sales inorgánicas como calcio, sodio, magnesio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, así como también de cantidades de materia orgánica disuelta [Butler & Ford, R.G (2018)]. Para que los elementos primarios de medición (sensores) determinen la magnitud del TDS se requiere establecer el valor de la conductividad eléctrica del medio líquido, interpretando la señal eléctrica durante la medición directa de la variable en unidades de ppm (partes por millón), por lo regular, estos sensores requieren la integración de sistemas de adquisición y procesamiento de señales, para ello, es común que sea resuelto con el empleo de microcontroladores [Sifuentes et al. (2017)], así mismo, requieren de elementos de visualización que sean capaces de otorgar al operador de la planta la medición en línea de manera clara y simplificada, no obstante, esto conlleva a una dependencia de los procesos por este tipo de sistemas de monitoreo, ya que a través de ellos, el operador puede determinar si el proceso opera de manera nominal o si se requiere de alguna medida de ajuste a fin de evitar desviaciones en el proceso, así mismo, estos sistemas se emplean para garantizar la seguridad operativa de los equipos de producción, de esta manera, es evidente que un monitoreo ausente, con retardos o deficiente puede repercutir directamente en la calidad de los productos [Syu et al. (2020)], en consecuencia, provocar sobrecostos por pérdidas o remanufacturas los cuales suprimen la rentabilidad del proceso, para evitar esta situación, usualmente se invierte en equipos de monitoreo comerciales, con la desventaja que pueden ser costosos y muchas veces de requerir un alto grado de mantenimiento, además pueden ser difíciles de integrar tanto físicamente como eléctricamente elevando el nivel de complejidad en la planta productora, provocando que los sistemas de producción carezcan de eficiencia [Cheng et al. (2021)], en tal caso, tanto procesos y usuarios se tienen que adaptar a las funcionalidades preprogramadas de fábrica de estos sistemas, las cuales podrían no ser las adecuadas para resolver todas las necesidades específicas del proceso en cuestión, de la misma manera, puede generarse un impedimento con la interconexión con los equipos ya instalados, esto es, por la incompatibilidad en los niveles eléctricos de las señales [Gil et al. (2021)], así como por la diferencia en los protocolos de comunicación, e incluso por sus dimensiones físicas en campo, así mismo, dificultades por diferencias en los niveles de alimentación eléctrica requeridos para su funcionamiento. Para establecer la mejor solución en

sistemas y equipos de monitoreo se debe asegurar que los sistemas sean flexibles, es decir, cuenten con un alto grado de adaptación al proceso, atendiendo tanto la base teórica del proceso, así como de su implementación experimental [Folgado et al. (2024)]. La dificultad de adaptación de los sistemas de monitoreo que se enfrenta la gran mayoría de los procesos productivos corresponde a las condiciones ambientales y productivas en donde se encuentra la medición de la variable del TDS, muchas veces, el fabricante establece condiciones de instalación y operación que los procesos podrían no cumplir [Qiang et al. (2025)]. Otro aspecto importante, es considerar la integración física de los elementos que componen el sistema de monitoreo, en tal caso, si los elementos se encuentran dispersos físicamente en la instalación se complica el mantenimiento, alternativamente, el hecho de contar con sistemas modulares concentrados otorgan a los operadores unidades centralizadas simplificadas [Kouvakas et al. (2023)], con ello, se puede alcanzar en la instalación una rápida identificación rápida de fallas y reducir los tiempos de mantenimiento a fin de evitar tiempos muertos de producción, sin duda esta situación tiene impacto favorable en los tiempos de entrega de los productos, además si se cuenta con diseños específicos tomando en cuenta las características físicas de los elementos (sensores, procesadores y visualizadores) conlleva a la optimización del espacio físico productivo, esto puede ser altamente deseable para temas de regulación operativa y atención al cumplimiento de normativas oficiales relacionadas a espacios de trabajo seguros (NOM-001-STPS-2008, NOM-036-1-STPS-2018 y NOM-019-STPS-2011) [Ahmad et al. (2022)]. La consideración de estos aspectos mencionados en el diseño de sistemas de monitoreo pueden verse las ventajas de su implementación en algunos trabajos que evidencian la motivación por el diseño especializado, por ejemplo, en Alfiqri et al. (2022) se utiliza un microcontrolador para medir la calidad del agua a través del TDS en un proceso químico, en Saraswati et al. (2024) se valida la calidad del agua de consumo a través de un sistema de monitoreo con una interfaz gráfica de usuario, de la misma manera, en Sulistiyanto et al. (2023) se utiliza un microcontrolador basado en IoT (por sus siglas en inglés, *Internet of Things*) para monitorear el TDS en estanques de acuicultura. Con ello, el objetivo del trabajo es diseñar un sistema embebido para el monitoreo del TDS del agua agrupando componentes electrónicos de fácil acceso, se pretende facilitar al usuario el monitoreo claro y simplificado, a través de una interfaz gráfica para garantizar la calidad de los productos en procesos en donde sea esencial medir las propiedades del agua.

1.1 Organización del documento

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera, en la sección II puede ser consultada la metodología que describe los métodos utilizados para llevar a cabo el desarrollo del trabajo, así mismo, en la sección III se reportan los resultados obtenidos del sistema para la validación de este, posteriormente, en la sección IV se establecen las conclusiones y la discusión obtenidas del trabajo desarrollado, seguido de ello se puede consultar las referencias utilizadas.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo se estructuró en submódulos funcionales interconectados para alcanzar la funcionalidad integral del sistema, estos son identificables como: el sensado de la variable del TDS, el elemento microcontrolador para la adquisición y procesamiento señales, la interfaz gráfica del usuario y la estructura física o chasis para la integración física centralizada de todos los componentes. En cuando al sensado, se utilizó el sensor del TDS Meter V1.0, esté último es un sensor de tipo analógico, cuya salida se establece en un rango voltaje de entre 0 y 2,3V, de acuerdo al fabricante, su rango de medición va de los 0 a los 1000ppm, este mismo está acoplado en un módulo de placa con una interfaz de conexión XH2.54-2P, así mismo requiere una alimentación eléctrica de entre 3.3 y 5V, así mismo, cuenta con una sonda sumergible para tomar la lectura directa del TDS del medio líquido, que en este caso se utilizó agua común del servicio de agua municipal de la ciudad de Orizaba Veracruz. En cuanto al elemento para para la adquisición y procesamiento de señales se utiliza un módulo microcontrolador ESP32-WROOM-32 cuyo núcleo incorpora el chip ESP32-D0WDQ6, este opera con una frecuencia de CPU ajustable de entre 80MHz-2540MHz, además incorpora un procesador de doble núcleo de 32-bit LX6, de igual manera el microcontrolador posee puertos I/O de propósito general configurables, cuenta también con protocolos de comunicación SPI, UART, I2S e I2C, así mismo, y de acuerdo a uso de sus funciones posee consumo eléctrico de 250mA que lo convierte en un sistema de bajo consumo ideal para un funcionamiento permanente. La conexión de estos dos elementos se realiza configurando cualquier puerto analógico de uso general como entrada en el microcontrolador, en este trabajo, se determina que la alimentación eléctrica de estos elementos sea independiente realizando una conexión común de sus terminares de GND (tierra). En la Figura 1 se muestra la conexión física entre el sensor y el microcontrolador.

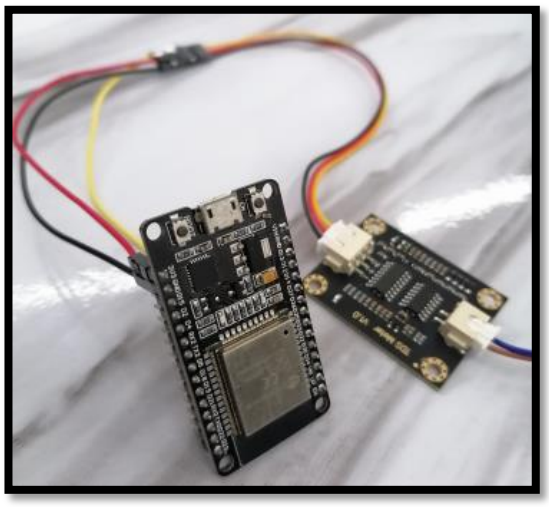


Fig. 1. Conexión del sensor de TDS y el ESP32.

Una vez energizado el sensor, el microcontrolador se encarga de realizar la adquisición de la señal analógica proveniente del mismo, esto se realiza con un retardo configurado de 5 segundos, la señal del TDS se procesa para efectuar la relación voltaje-ppm a través del convertidor analógico-digital del

microcontrolador, el cual tiene una resolución de 10bits. Una vez adquirida y procesada la señal eléctrica del elemento primario de medición, los datos se envían hacia una pantalla HMI a color de 4" de la marca DWIN modelo DMG48270C043_04WN, esta cual cuenta con una resolución de 480x272 pixeles, así mismo, la pantalla tiene una interfaz de usuario tipo UART para comunicar las señales. A continuación, en la Figura 2 se muestra el aspecto de la pantalla HMI descrita anteriormente.

Fig. 2. Pantalla HMI DWIN.

En la pantalla, se despliega visualmente una interfaz programada para la visualización de las mediciones del TDS en línea del proceso, el desarrollo de esta se realizó utilizando el software DGUS Tool y pretende mostrar de forma clara y simplificada el valor en línea de los ppm del medio líquido del proceso. Posteriormente, una vez establecida la conexión eléctrica de los elementos se estableció la distribución física centralizada de los elementos mediante el diseño CAD y posterior impresión 3D de un chasís específico para cada elemento del sistema, esto fue logrado mediante el software Autodesk Fusion. En la Figura 3 que aparece a continuación se muestra una captura de pantalla del proceso del diseño.

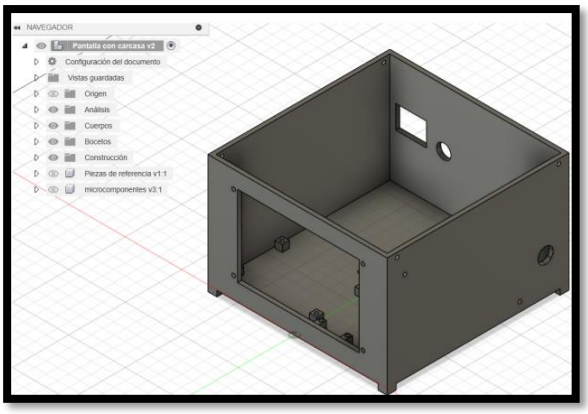


Fig. 3. Diseño del chasis del sistema de monitoreo del TDS.

Las dimensiones aproximadas del chasis son de 250x180x200mm, además, como se puede observar fue necesario extruir los barrenos para poder fijar cada pieza, esto anterior con tornillos de 3mm de grosor por los que se consideró dejar tolerancias de 0.2mm (barreno de 3.2mm). También fue necesario agregar escalones en los 4 lados de la parte inferior para otorgarle una elevación con respecto al piso para evitar posibles sobrecalentamientos por la operación del sistema. Una vez integrado el sistema de manera eléctrica y físicamente el sistema se dispone ahora para comprobar su funcionamiento, en la Figura 4 se muestra el aspecto centralizado del sistema en su chasís.

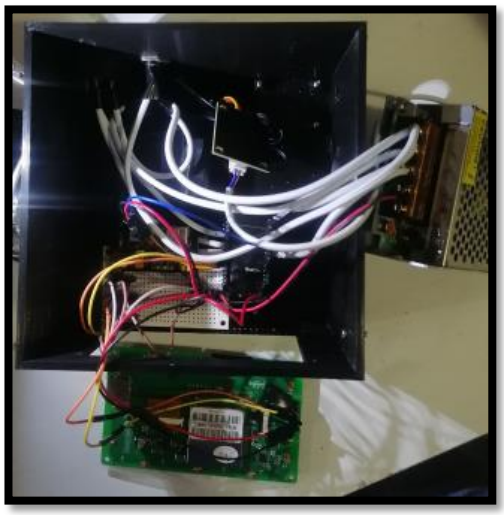


Fig. 4. Integración en chasis sin tapa.

2.1 Condiciones de experimentación

En el presente trabajo el sistema de monitoreo desarrollado se comprueba a través del monitoreo del TDS mediante la medición de agua municipal de la ciudad de Orizaba, para ello se tomó una muestra de la misma agua en 6 recipientes y se efectuó una toma de medición cada 5 segundos. Así mismo es importante destacar que la sonda del sensor no debe de tocar las paredes del recipiente. Así mismo de acuerdo con la CONAGUA los rangos de agua municipal están establecidos entre un valor de 262 y 412ppm, valores que están por debajo del límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para agua destinada al consumo humano. La experimentación se llevó a cabo en una temperatura ambiente de 22°C, así mismo la altitud sobre el nivel del mar de la ciudad donde se lleva a cabo la experimentación se indica que es de 1218msnm, por otra parte, la humedad relativa indicada sobre la medición es de 68%.

3. RESULTADOS

Los resultados del sistema embebido de monitoreo automático del TDS del agua se muestran en la presente sección, en primer lugar, se presentan los resultados de la medición en 6 recipientes efectuada cada 5 segundos durante 25 veces, para ello se obtiene el promedio de las mediciones y se reportan en la Tabla 1 que se muestra a continuación.

Tabla 1. Promedio de las 25 mediciones en los 6 recipientes.

Vaso	Promedio (ppm)
1	306.92
2	305.48

3	312.64
4	317.4
5	317.56
6	319.56

Como se puede apreciar en la Tabla 1, el valor corresponde al rango esperado y reportado por la CONAGUA

$$P_{rom} \in [262 - 412] ppm \ (1)$$

El aspecto de la interfaz desarrollada dentro del chasis que el usuario puede consultar por la parte frontal se muestra en la Figura 5 que aparece a continuación.

Fig. 5. Aspecto de la interfaz de usuario del sistema de monitoreo del TDS desarrollado.

Para profundizar en el análisis de los datos obtenidos, si se calcula el promedio general de los 6 promedios individuales se calcula que se tiene un valor de 313.59ppm, con ello se procede a calcular la varianza muestral con la siguiente ecuación:

$$s^2 = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \ (2)$$

Haciendo el cálculo se obtiene un valor de $s^2 = 35.4 ppm^2$, posteriormente para obtener la desviación estándar se calcula que $s = 5.95 ppm$, con ello el porcentaje de dispersión se calcula como:

$$\%_{disp} = \frac{s}{prom_{gral}} = \frac{5.95}{313.59} \times 100 \approx 1.9\% \ (3)$$

Con ello puede notarse que tanto la medición del sensor como las condiciones de la experimentación fueron uniformes y estables, de esta manera se tiene una referencia para la demostración del desempeño del sistema embebido.

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El presente trabajo mostró el diseño e implementación de un sistema embebido para el monitoreo del TDS en el agua, el sistema se basó en un microcontrolador ESP32 y un sensor analógico. La incorporación de una interfaz gráfica permitió al usuario visualizar en línea de forma simplificada las mediciones, proporcionando una herramienta clara, intuitiva y funcional que minimiza posibles desviaciones no detectadas en el proceso de monitoreo. La integración de los elementos primarios de medición, los módulos de visualización y el diseño físico mediante herramientas CAD demostró la viabilidad de un sistema completamente integrado tanto a nivel eléctrico como estructural. Esta integración permitió desarrollar una solución embebida compacta y específica, reduciendo las limitaciones asociadas a la dispersión física de los componentes y aumentando la flexibilidad para su aplicación en distintos entornos donde se requiera la medición del TDS en agua, conforme a las capacidades del sensor empleado. Los resultados experimentales mostraron una dispersión del 1.9% en las mediciones, valor que valida la confiabilidad del sistema, el valor se atribuye principalmente a variaciones en las condiciones ambientales (temperatura, presión atmosférica y humedad). Por lo tanto, el sistema desarrollado ofrece una medición del TDS confiable, simplificada y adaptable, permitiendo al usuario disponer de una herramienta eficiente y flexible en su aplicabilidad para la supervisión de la calidad del agua en tiempo línea.

REFERENCIAS

Abbas, T., Ammouri, Q. M., Shihab, T. & Jabur, O. (2021). Decreasing the tendency of water to form scale and corrosion in cooling towers – south refineries company (SRC) – *Iraq. Journal of Petroleum Research and Studies*, 11, 15-29. https://doi.org/10.52716/jprs.v11i2.512

Abdelhady, S., El-Badawy, S.M., El-Gammal, M., and Mohamed, A. (2023). Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: a review of the issues, conventional, and remote sensing techniques. *Remote Sensing*, 15(14), 3534. MDPI, Basel, Switzerland. https://doi.org/10.3390/rs15143534

Ahmad, T.L., Fitria, H. & Hakim, C.B. (2022). The influence of work safety culture and work safety monitoring system on work safety. *Journal of Industrial Engineering and Halal Industries*, 3(1), 57-63. https://doi.org/10.14421/jiehis.3486

Alfiqri, F., et al. (2022). Microcontroller-based water quality monitoring system implementation. Brilliance: *Research of Artificial Intelligence*, 2(2). https://doi.org/10.47709/brilliance.v2i2.1544

Butler, B.A. & Ford, R.G. (2018). Evaluating relationships between total dissolved solids (TDS) and total suspended solids (TSS) in a mining-influenced watershed. *Mine Water and the Environment*, 37(1), 18-30. https://doi.org/10.1007/s10230-017-0484-y

Cheng, C.-Y., Pourhejazy, P., Hung, C.-Y. & Yuangyai, C. (2021). Smart monitoring of manufacturing systems for automated decision-making: a multi-method framework. sensors, 21(20), 6860. https://doi.org/10.3390/s21206860

Folgado, F.J., Calderón, D., González, I. & Calderón, A.J. (2024). Review of industry 4.0 from the perspective of automation and supervision systems: definitions, architectures and recent trends. *Electronics*, 13(4), 782. https://doi.org/10.3390/electronics13040782

Gil, S., Zapata-Madrigal, G.D., García-Sierra, R., Cruz Salazar, L.A. & et al. (2022). Converging IoT protocols for the data integration of automation systems in the electrical industry. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 9, 1. https://doi.org/10.1186/s43067-022-00043-4

Hidayatullah, M., Sofyan, S., Ali Topan, P., Andriani, T. & Nurhairunnisah, N. (2022). Monitoring system of water quality on hydroponic planting media using total dissolved solid (TDS) sensor based Arduino UNO R3. *Jurnal Ilmu Fisika Universitas Andalas*, 14(2), 108–115. https://doi.org/10.25077/jif.14.2.108-115.2022

Kouvakas, N. D., Koumboulis, F. N., Fragkoulis, D. G. & Souliotis, A. (2023). Modular supervisory control for the coordination of a manufacturing cell with observable faults. *Sensors*, 23(1), 163. https://doi.org/10.3390/s23010163

Qiang, L., Wang, Y., Zhao, F., Zheng, C. & Xie, J. (2025). A Review of the research progress of sensor monitoring technology in harsh engineering environments. *Sensors*, 25(20), 6308. https://doi.org/10.3390/s25206308

Saraswati, I., Himawan, G., Wiryadinata, R., Ramadhani, A., Haryanto, H., Franata, N., Setyo Yudono, M. & Erlindriyani, R.V. (2024). Prototype system for turbidity and TDS measurement of refill drinking water using Arduino microcontroller. Teknika: *Jurnal Sains dan Teknologi*.

Sifuentes, E., Gonzalez-Landaeta, R., Cota-Ruiz, J. & Reverter, F. (2017). Measuring dynamic signals with direct sensor-to-microcontroller interfaces applied to a magnetoresistive sensor. *Sensors*, 17(5), 1150. https://doi.org/10.3390/s17051150

Sulistiyanto, R., Setyobudi, R. & Tijaniyah. (2023). Utilization of TDS sensors for water quality monitoring and water filtering of carp pools using IoT. *EUREKA: Physics and Engineering*, (6), 69-77. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002865

Syu, W.-J., Chang, T.-K. & Pan, S.-Y. (2020). Establishment of an automatic real-time monitoring system for irrigation water quality management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 737. https://doi.org/10.3390/ijerph17030737

Vijayakumar, G., Rajkumar, M., Rajiv Chandar, N., Selvakumar, P. & Duraisamy, R. (2024). Environmentally friendly TDS removal from waste water by electrochemical ion exchange batch-type recirculation (EIR) technique. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 10, 826-835. https://doi.org/10.1039/D3EW00793F

Zhao, Q., Liu, Y., Wang, J. and Chen, X. (2022). Key points of water quality inspection of power boiler. *Science Discovery*, 10(3), 138–141. Science Publishing Group, New York, USA. https://doi.org/10.11648/j.sd.20221003.19

Fiber Optic Temperature Sensor Based on PDMS End-Capped Michelson Interferometer for Water Monitoring

Picos-Lopez Miriam Elizabeth*, Lopez-Cortes Daniel*, Ruiz-Pérez Víctor Iván*, Pérez-García Gilbert Francis*, Flores-Rosas Ariel*, Escalante-Zarate Luis*

** Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Chiapas, Carretera Emiliano Zapata km. 8, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas 29050, México.*
(e-mail: miriam.picos33@unach.mx, daniel.lopezc@unach.mx, vruiz@unach.mx, gilbert.perez@unach.mx, ariel.flores@unach.mx, luis.escalantez@unach.mx).

Abstract: This work presents a temperature sensor based on an offset structure formed by two laterally misaligned single-mode fibers, with the tip of the fiber coated in polydimethylsiloxane (PDMS). The offset region facilitates interference between core and cladding modes, while the PDMS layer introduces temperature sensitivity due to its high negative thermos-optic coefficient. The sensor´s reflected intensity was monitored over a temperature range of 25 °C to 60 °C. A linear response was observed, with a sensitivity of 0.087 dB/°C. The simple fabrication process, use of standard fiber, and cost-effective materials make this design a promising candidate for compact and reliable temperature sensing in industrial and biomedical applications. In particular, the sensor can be effectively applied for monitoring temperature of water in processes where precise thermal control is required.

Keywords: Temperature sensor, temperature water monitoring, optical fiber sensors, PDMS polymer, Michelson interferometer, offset interferometer

1. INTRODUCTION

Temperature is a critical parameter that must be measured in many processes and fields, including industry, biology, medicine, material engineering, and water quality. Accurate temperature measurement is crucial in many water-related applications, monitoring the water temperature is especially important for processes such as thermal management, biotechnological systems and environmental monitoring. Traditional temperature sensors, such as thermocouples and thermistors, can be limited for some applications by their size, susceptibility to corrosion and electromagnetic interference. In this frame, the demand for compact, robust, and cost-effective devices, particularly in corrosive environments, has grown significantly. However, traditional temperature measurement instruments have limitations in these areas, prompting the exploration of different solutions. An alternative solution for these drawbacks has emerged with the optical fiber sensors due to their intrinsic properties, such as immunity to electromagnetic interference, compactness, lightweight nature, and remote monitoring capabilities. Several fiber optic structures have been implemented to measure many physical quantities, such as refractive index, stress, and temperature as reported by M. Elsherif et al (2022). Remarkably, optical fiber devices based on an offset, despite their simple manufacturing process, have not been widely used for temperature measurement due to their low sensitivity to temperature caused by the fiber's low thermo-optic coefficient (TOC) (Niu et al., 2021). To address this, polydimethylsiloxane (PDMS) has been used to enhance the sensitivity of some temperature sensors due to its large TOC of -4.66×10^{-4}/°C (H. Gao et al., 2018) and (F. Wang et al.,2021). This work demonstrates a temperature sensor based on the offset structure with PDMS applied at the tip of the cleaved fiber. The sensor achieves a sensitivity of 0.087dB/°C, over a linear operating range from 25 °C to 60 °C.

2. METODOLOGY

This section presents the methodology used for the development of the sensor is presented. The process consists of four main steps. First, the device was fabricated by creating an offset between two single mode fibers using a fusion splicer. Second, the initial characterization of the device was carried out using an optical spectrum analyzer (OSA), during this stage, the length of the fiber segment following the offset was determined. Third, a droplet of PDMS was deposited onto de fiber tip as a final part of the fabrication. Finally, the sensor was characterized under temperature variations, to evaluate its thermal response and sensitivity.

2.1 Sensor Fabrication

The structure of the fabricated sensor is relatively simple as it requires only an offset between two single-mode fibers (SMFs). The manufacturing process does not involve specialized equipment or fibers with unconventional geometries. The offset was created using a conventional splicer operating in manual mode. Two SMFs were mounted on the fusion machine, and after initial alignment a lateral core misalignment was introduced by displacing one of the motors along a single axis. The splicer provides an estimation of the offset value after the loss estimation. To better control the

degree of misalignment between the cores, a light source was connected during the alignment process. By monitoring the output power, it was possible to establish a relationship between the input and the output powers for each offset value, enabling a better estimation of the core displacement. A schematic of the proposed sensor configuration is presented in Fig. 1.

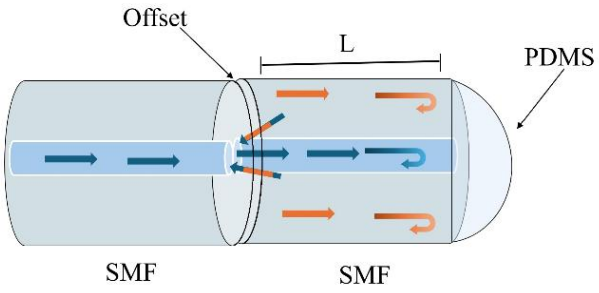


Figure 1. Schematic representation of the proposed optical fiber temperature sensor. The device is based on an offset structure between two single-mode fibers

In this configuration, the offset (2 µm) functions as a beam splitter, exciting cladding modes alongside the fundamental core mode. After propagating along the fiber segment with 7 mm length, the light reflects at the end face of the fiber and returns to the offset region, which now acts as a beam combiner. This setup produces interference between the fundamental mode and the cladding modes, effectively mimicking the behavior of a Michelson interferometer (MI).

Since the structure is based on the Michelson Interferometer, the interference intensity can be described with the two-beam interference eq. (1):

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\phi) \tag{1}$$

where:

- I is the total reflected intensity
- I_1, I_2 are the intensities of the fundamental and cladding modes respectively
- $\Delta\phi$ is the phase difference between the two modes

The phase difference is given by eq(2):

$$\Delta\phi = \frac{4\pi L \Delta n_{eff}}{\lambda} \tag{2}$$

where

- Δn_{eff} is the effective refractive index difference
- λ is the wavelength.

Another important parameter to be considered in the spectrum, is the free spectral range, which is the wavelength spacing between two adjacent maxima (or minima), and is defined in eq. (3) as:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2n|\Delta L|} \tag{3}$$

Here:

- λ is the operating wavelength
- n is the refractive index of the optical fiber
- ΔL is the optical path length difference

and

$$\Delta L = 2n(L_2 - L_2) \tag{4}$$

where

L_1, L_2 are the physical lengths of the two arms.

The reflected interference spectrum is shown in Fig. 2, where a sinusoidal pattern is formed as the light is reflected at the fiber tip where the spectrum presents a sinusoidal form, characteristic of the Michelson interferometer. The free spectral range of a spectrum is defined as the distance between two adjacent wavelengths, and in this case the FSR is about 32 nm, which corresponds to a length of 7 mm from the offset to the fiber tip, this parameter can be modified by just increasing or decreasing the length to select a specific wavelength. This is important because for different applications a particular wavelength usually is desired.

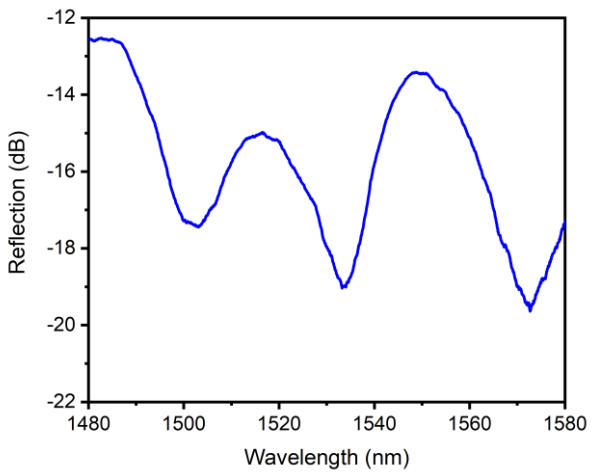


Figure 2. Reflected spectrum of the device without any coating in the fiber tip. The device is based on an offset structure between two single-mode fibers

The reflection at the fiber end face can be modified by altering the refractive index at the interface. Initially, this interface is

between glass and air but can be modified just by covering the tip with a material with different refractive index, in this way inducing changes in the reflected intensity at the interface. To introduce temperature sensitivity, the fiber tip was coated with PDMS, creating a glass-PDMS interface. Since the polymer has a temperature-dependent refractive index, this modification allows the sensor to detect temperature changes based on variations in the reflected intensity (X. Y. Zhang et al., 2014).

The PDMS was prepared by mixing the base and curing agent in a 1:10 ratio by weight, as recommended by the manufacturer. The mixture was thoroughly stirred to ensure homogeneity and then degassed under vacuum to eliminate air bubbles that could interfere with the coating quality. The deposition process involved vertically dipping the cleaved tip of a single mode fiber into the uncured polymer, allowing a semi-spherical droplet to form naturally at the end, due to surface tension. To ensure precise and localized coating, the fiber was mounted on a movable translation stage and aligned face-to- face with another fiber fixed in a fusion splicer. This configuration allowed for accurate positioning and minimized the spread of the polymer along the fiber surface, restricting the coating just onto the tip. The resulting structure ensures a well-defined glass-PDMS interface, which is critical for consistent reflection behavior. The deposition process is illustrated in Fig. 3.

Afterwards, the fiber was mounted on a movable stage and aligned face-to-face to another fiber previously positioned in a splicer. When the fibers were aligned, they were pushed face to face just in a way that the polymer touched the cleaved face of the other fiber, in this way, it was possible to cover only the tip of the fiber with PDMS. This method allowed the polymer to cover only the tip of the fiber without being scattered to other parts of the fiber. The amount of PDMS can be controlled by pushing the fibers apart, this part of the process is shown in Fig. 3, also the final device is coated with PDMS only at the fiber tip is observed. This configuration allows the refractive index of the PDMS to vary with the temperature. Due to its negative TOC, the refractive index of PDMS decreases as the temperature increases.

As a result, reflection occurs at the glass-polymer interface, which can be described by the Fresnel reflection coefficient for normal incidence.

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \quad (2)$$

where:

- n_1 is the refractive index of the optical fiber (glass),
- n_2 is the refractive index of the PDMS.

According to eq. (2), as n_2 decreases with the increasing temperature, the reflection coefficient R increases. Therefore, the reflected intensity at the fiber tip increases as the PDMS refractive index decreases, because the denominator of the equations is reduced and it is inversely proportional to R.

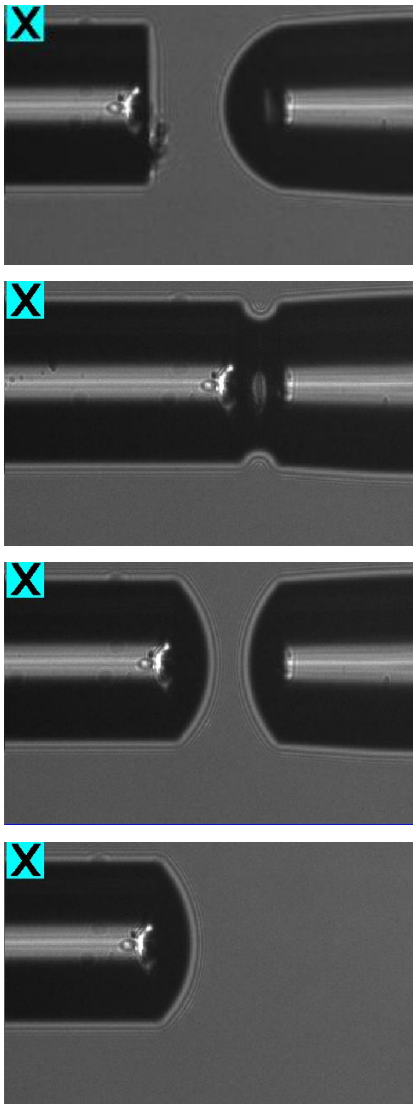


Figure 3. Photographic sequence of the PDMS process on the fiber tip. (a) The fiber dipped in the polymer is aligned face-to-face with the target fiber. (b) The fiber comes closer to coating the target fiber with PDMS. (c) the fibers are separated and finally (d) the target fiber is coated with PDMS at the tip.

The experimental setup used for the characterization of the optical fiber temperature sensor is illustrated in Fig. 4. A superluminescent diode (SLD) was used as a broadband light source, operating in the near-infrared region with a central wavelength of approximately 1550 nm. The SLD was connected to port 1 of a three-port optical circulator. The sensor was connected to port 2, and the reflected light from the sensor head was launched to port 3, which was connected to an optical spectrum analyzer (OSA). This configuration allows continuous monitoring of the reflected signal while the source is isolated from the detector, minimizing back-reflection and insertion loss. The sensor head-comprising the offset fiber structure with PDMS-coated tip was placed on a temperature-controlled hot plate. The temperature was increased from 25

°C to 60 °C in steps of 5 °C. At each temperature point, the system was allowed to stabilize from approximately 5 minutes to ensure thermal equilibrium before the reflection spectrum was recorded. The measurements were repeated three times at each temperature to ensure reproducibility and reduce experimental uncertainty. The spectral response was analyzed to observe the intensity variation of the reflected signal, which is sensitive to changes in the refractive index of the PDMS. Due to the negative thermos-optic coefficient of PDMS, its refractive index decreases with increasing temperature, leading to a measurable change in the Fresnel reflection at the fiber-polymer interface. This change directly affects reflected intensity recorded by the OSA, allowing for the correlation between temperature and the optical signal.

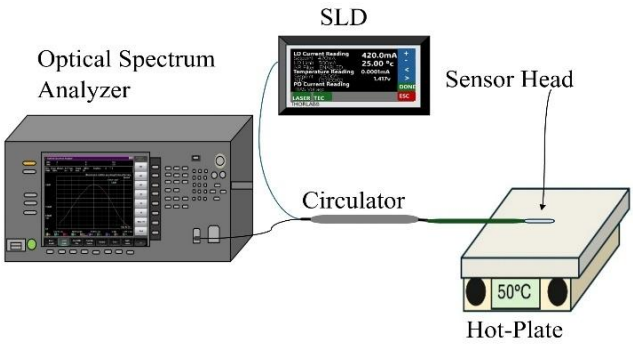


Figure 4. Schematic of the setup used for the sensor characterization

All measurements were conducted under controlled ambient to minimize environmental noise. The data was later processed using a peak detection algorithm to extract the reflected signal intensity at specific wavelength, and then the temperature-intensity calibration curve was generated to determine the sensor sensitivity and linearity.

3. RESULTS AND DISCUTION

The sensor´s response to temperature variations is depicted in Fig. 5, where a clear increase in the intensity of the reflected signal is observed with rising temperature. This behavior is attributed to the negative thermos-optic coefficient of the PDMS, which causes a decrease in its refractive index as the temperature increases. As a result, the Fresnel reflection at the glass-PDMS interface increases, leading to a measurable rise in the reflected power. This is consistent with the Fresnel reflection coefficient at normal incidence, which depends on the refractive index contrast between the fiber core and the surrounding medium.

To quantify the performance of the sensor, Fig. 6 shows the temperature dependence of the reflected intensity at three distinct interference dips from Fig 5. Each dip exhibits a strong linear relationship between reflected intensity and temperature, with coefficient of determination (R^2) values of 0.978, 0.983, and 0.980 for dips 1, 2, and 3 respectively. The corresponding sensitivities are 0.075, 0.085, and 0.087 dB/°C, demonstrating the capability of the sensor for reliable and repeatable temperature measurements within the tested range.

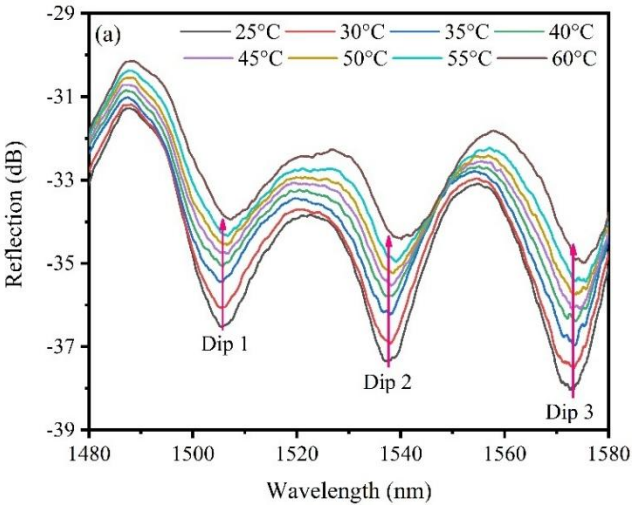


Figure 5. Increase in the intensity of the reflected signal is observed with rising temperature. This behavior is attributed to the negative thermos-optic coefficient of the PDMS, which causes a decrease in its refractive index as the temperature increases.

It is also observed that the dips at shorter wavelengths, particularly around 1550 nm, exhibit slightly lower sensitivity and reduce dynamic range. This behavior can be explained by the wavelength-dependent modal interference conditions and the spectral characteristics of the offset structure. Furthermore, the free spectral range (FSR) of the interference pattern is influenced by both, the fiber segment length L and the lateral offset introduced during fabrication. By adjusting these parameters, it is possible to tune the position and the spacing of the interference dips, enabling the sensor to operate at optimized wavelength for maximum sensitivity or specific applications requirements.

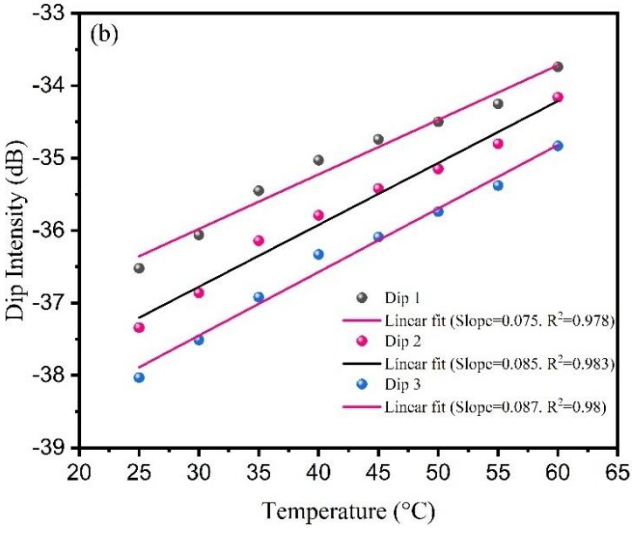


Figure 6. The temperature dependence of the reflected intensity at three distinct interference dips from Fig. 5.

This flexibility demonstrates the potential of the proposed structure for wavelength-selective temperature sensing across the 25-60 °C range. Which is important in industrial processes, for example, in water treatment where temperature affects

chemical reactions in treatment plants and the efficiency of disinfection.

This capability significantly broadens the potential application scope of the proposed sensor, particularly in areas where compactness, sensitivity, and ease of integration are critical. For instance, it can be employed in real-time water temperature monitoring in environmental systems, where accurate and responsive sensing is essential. In biomedical applications, the sensor´s small size and biocompatible polymer coating make it suitable for localized temperature measurements, such as microfluidics devices, tissue monitoring, or wearable health diagnostics. Additionally, its low fabrication cost and high sensitivity, position the sensor as a promising candidate for deployment in distributed sensing networks and industrial process control systems.

4. CONCLUSION

A fiber optic temperature sensor on a Michelson interferometer configuration has been successfully demonstrated, utilizing an offset structure between two single-mode fibers to generate modal interference. The sensing structure was formed by cleaving one of the fibers to a defined length and its end face was coated with PDMS. Due to the negative thermos-optic coefficient of PDMS, its refractive index decreases as the temperature increases. This leads to a higher reflected intensity at the fiber-polymer interface, making the structure able to sense temperature changes. The sensor exhibited a linear response over the temperature range of 20-60 °C, with a maximum sensitivity of 0.087 dB/°C and a coefficient of determination (R^2) of 0.978, confirming good repeatability and measurement stability. The results validate the potential of using simple offset structures in combination with functional materials like PDMS for effective temperature sensing. These characteristics make the sensor well suited for water temperature applications, where accurate and stable measurements are critical for processes such as environmental monitoring, industrial cooling systems, and domestic water management.

Future work will focus on the systematic optimization of key structural parameters, including fiber length, offset, displacement, and polymer thickness, to further enhance the sensor's overall performance. These parameters play a crucial role in determining the device's optical response, sensitivity, and spectral resolution. By carefully tuning each variable, it is expected that the sensor will achieve improved detection accuracy and a broader operational range, enabling its use in more demanding sensing environments. To ensure the long-term stability and reliability of the system, the sensor structure can be encapsulated within a capillary tube. This protective encapsulation will shield the sensitive components from external mechanical stress, humidity, and contamination, thereby increasing the device's robustness and useful time. Such an approach will make the sensor more suitable for real-world applications, including industrial monitoring, biomedical diagnostics, and environmental sensing.

Moreover, special attention will be given to investigating the effect of polymer layer thickness on the optical response. By characterizing how variations in thickness influence refractive index modulation and evanescent field interactions, it will be possible to determine the optimal polymer dimensions that yield maximum sensitivity and consistent spectral performance. Experimental and numerical analyses will be combined to establish design guidelines for achieving high-performance, reproducible, and application-specific optical fiber sensors. The proposed sensor represents a promising solution for accurate temperature monitoring in aquatic environments, offering significant potential for applications in water quality assessment, environmental protection, and resource management. Temperature is a key parameter that influences numerous physical, chemical, and biological processes in water bodies, including dissolved oxygen concentration, microbial activity, and pollutant dispersion. By providing high sensitivity and stability, the proposed sensor enables continuous and precise measurement of temperature variations, which is essential for understanding thermal dynamics in rivers, lakes, and coastal ecosystems.

In addition, its compact design and compatibility with optical fiber systems make it suitable for deployment in both surface and subsurface monitoring networks, as well as in harsh or remote locations where conventional sensors may fail. The robustness of the structure allows for long-term operation with minimal maintenance, reducing operational costs and improving data reliability. Such features make the sensor particularly advantageous for applications such as tracking thermal pollution, studying the effects of climate change on aquatic habitats, and optimizing temperature regulation in aquaculture systems. Overall, the proposed design contributes to advancing smart water monitoring technologies by combining precision, durability, and adaptability to diverse environmental conditions.

REFERENCES

Elsherif, M., *et al.* (2021) 'Optical fiber sensors: working principle, applications, and limitations', *Advanced Photonics Research*, 3, 2100371.

Gao, H., Hu, H., Zhao, Y., Li, J., Lei, M. and Zhang, Y. (2018) 'Highly-sensitive optical fiber temperature sensors based on PDMS/silica hybrid fiber structures', *Sensors and Actuators A: Physical*, 284, pp. 22–27.

Niu, H., *et al.* (2021) 'Optical Fiber Sensors Based on Core-Offset structure: A review', *IEEE Sensors Journal*, 21, pp. 22388–22401.

Wang, F., *et al.* (2021) 'A Highly sensitive temperature sensor with a PDMS-coated tapered dispersion compensation fiber structure', *Optics Communications*, 497, 127183.

Zhang, X.Y., *et al.* (2014) 'Miniature End-Capped Fiber Sensor for Refractive Index and Temperature Measurement', *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(1), pp. 7–10.

Sustainable Water Management in Denim Laundries: Initial Field Evidence in Tehuacán, Puebla

Pérez Hernández, Omar*, Araoz Baltazar, Iván*, Martínez Zarate, Israel *, Araoz Baltazar, Ángel*, Del Ángel Medina, Oscar*, Granados Sánchez, Angélica**

** Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico s/n, Tehuacán, Puebla. C.P.75770. (omar.ph@tehuacan.tecnm.mx, ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx, israel.mz@tehuacan.tecnm.mx, angel.ab@tehuacan.tecnm.mx, M24361285@tehuacan.tecnm.mx).).*

*** Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico s/n, Tehuacán, Puebla. C.P.75770. (angelica.gs@tehuacan.tecnm.mx)*

Abstract: This study presents preliminary findings from a project aimed at evaluating water consumption, technological adoption and wastewater management practices in denim laundries located in Tehuacán, Puebla. The methodological approach integrated a bibliometric analysis, a systematic literature review and fieldwork through a structured survey applied to ten industrial facilities. Results show a strong dependence on traditional wet processes with high water consumption, ranging from 250 to 600 liters per cycle, along with minimal water reuse and partial or nonexistent wastewater treatment. Although scientific literature reports technologies capable of significantly reducing water use, their adoption in the region remains limited due to investment costs, lack of technical knowledge and insufficient institutional support. Nevertheless, most companies expressed willingness to implement sustainable technologies if supported with financing, training and specialized technical guidance. These findings provide a solid baseline for the next phase of the project, which will focus on developing water management strategies and evaluating feasible technological alternatives to reduce environmental impact and improve operational efficiency in the regional denim sector.

Keywords: Water management; Denim; Industrial laundries; Sustainability; Wastewater treatment; Sustainable technologies; Tehuacán.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la mezclilla es una de las actividades textiles más intensivas en el uso de agua y en la generación de efluentes con alta carga química, particularmente en los procesos de lavado y acabado de prendas. Estudios recientes señalan que el tratamiento inadecuado de aguas residuales con colorantes como índigo, agentes oxidantes y sólidos en suspensión representa un riesgo relevante para los cuerpos de agua y los ecosistemas circundantes (Arenas et al., 2017; Rodríguez et al., 2013). A nivel internacional se han desarrollado tecnologías sostenibles como ozono, láser, nebulización y procesos enzimáticos, las cuales han mostrado reducciones importantes en consumo hídrico y descarga contaminante; sin embargo, su adopción plena aún enfrenta barreras asociadas al costo de inversión, la falta de capacitación técnica y la escasa infraestructura en pequeñas y medianas lavanderías (Atav et al., 2024; Hasan et al., 2024; Nadeem et al., 2024).

Tehuacán, Puebla, constituye uno de los principales polos nacionales de lavanderías de mezclilla, con una concentración de empresas que diariamente consumen grandes volúmenes de agua provenientes de pozos, pipas o fuentes mixtas. La región enfrenta presiones crecientes sobre el recurso hídrico y un marco regulatorio que exige mayor control sobre las descargas industriales. En este contexto, es necesario generar información objetiva sobre las prácticas actuales y evaluar el potencial de adopción de alternativas más eficientes.

El presente trabajo presenta los avances iniciales de un proyecto macro orientado a la gestión sostenible del agua en lavanderías de mezclilla. Para ello se integran tres componentes: una revisión bibliométrica sobre tendencias globales en tecnologías sustentables para la mezclilla, una revisión sistemática de literatura basada en criterios PRISMA y un estudio de campo aplicado a diez lavanderías de Tehuacán. Los resultados preliminares permiten caracterizar el uso actual del agua, identificar barreras tecnológicas y reconocer la disposición de las empresas para adoptar mejoras, proporcionando las bases para desarrollar estrategias de transición hídrica sostenible en el sector.

2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló mediante un enfoque mixto compuesto por tres etapas. En primer lugar, se realizó un análisis bibliométrico en Scopus para identificar tendencias globales en sostenibilidad aplicada al lavado y tratamiento de mezclilla. El procesamiento se efectuó con Bibliometrix (Aria

& Cucurullo, 2017), lo que permitió reconocer temas predominantes como tecnologías de bajo consumo hídrico, procesos en seco y métodos avanzados de tratamiento de efluentes. Posteriormente, se llevó a cabo una revisión sistemática basada en los lineamientos PRISMA (Page et al., 2021), seleccionando artículos revisados por pares relacionados con reducción del consumo de agua, acabados alternativos y tratamiento de aguas residuales en prendas de mezclilla.

El proceso de filtrado y selección de documentos en la revisión sistemática, se observa en la Figura 1.

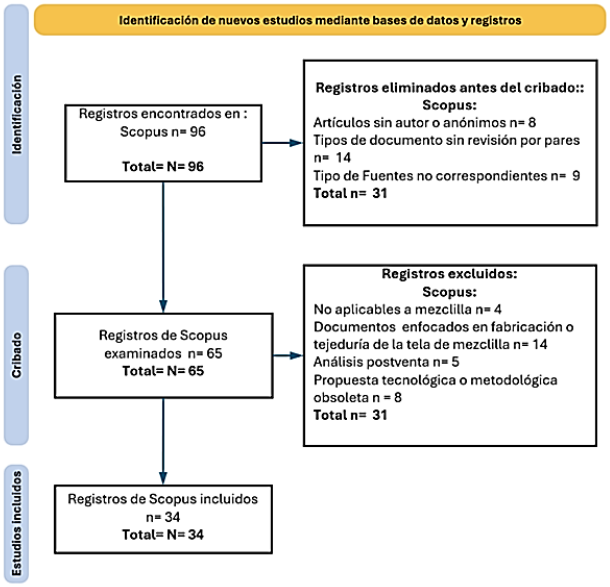


Fig. 1. Proceso de filtrado y selección de la revisión sistemática.

Con base en los hallazgos obtenidos en estas dos primeras etapas, se diseñó y aplicó una entrevista semiestructurada de carácter exploratorio dirigida a representantes del sector, con el objetivo de comprender prácticas operativas, procesos críticos y barreras tecnológicas. Debido a su propósito cualitativo y diagnóstico, no requirió validación formal y sirvió para orientar el diseño del instrumento cuantitativo posterior.

En la tercera etapa se elaboró una encuesta estructurada con siete secciones: datos generales, procesos de lavado, consumo de agua, tecnologías utilizadas, tratamiento de efluentes, percepción ambiental y disposición al cambio. La encuesta se aplicó a diez lavanderías de Tehuacán y municipios cercanos. Los datos cuantitativos se analizaron mediante estadística descriptiva, mientras que las respuestas abiertas se categorizaron para identificar patrones y percepciones comunes.

La integración de estas tres etapas permitió conformar un diagnóstico preliminar que combina evidencia científica, análisis técnico y datos reales del contexto local.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados integran evidencia bibliométrica, revisión sistemática y hallazgos derivados del estudio de campo aplicado en diez lavanderías industriales de Tehuacán (Tabla 1, A–J). Este abordaje permite comparar tendencias científicas globales con las prácticas operativas reales del sector local.

3.1 Resultados del análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico mostró una tendencia creciente en la investigación sobre sostenibilidad en el acabado de mezclilla, concentrada principalmente en China, India, Turquía, Italia y Estados Unidos, países con una fuerte presencia en la industria textil global (Hasan et al., 2024). Los términos más frecuentes fueron ozone, laser, sustainable denim, wastewater treatment, enzymatic finishing y dry processes, lo cual coincide con el énfasis internacional en tecnologías de bajo consumo hídrico y alternativas de tratamiento de efluentes (Zapata et al., 2021; Ben Fraj & Jaouachi, 2021).

Se identificaron tres líneas temáticas principales:

- Tecnologías en seco o de bajo consumo, como ozono, láser y nebulización.
- Optimización de procesos húmedos mediante enzimas y químicos menos agresivos.
- Tratamiento eficiente de aguas residuales, incluyendo coagulación–floculación, filtración y oxidación avanzada.

Estos hallazgos sirvieron para estructurar la entrevista exploratoria y posteriormente el diseño de la encuesta aplicada en campo.

3.2 Hallazgos de la revisión sistemática

La revisión sistemática incluyó 34 estudios relacionados con reducción de consumo hídrico, uso de tecnologías alternativas y tratamiento de efluentes textiles. Entre ellos destacan tecnologías capaces de reducir entre 30% y 70% el uso de agua (Uysaler et al., 2025), así como sistemas avanzados de tratamiento que alcanzan eficiencias superiores al 80% (Solís et al., 2013; Rodríguez et al., 2013).

Las alternativas identificadas se agruparon en dos grandes categorías: procesos de lavado o terminado y tratamiento de aguas residuales, sintetizadas en la Figura 2.

Fig. 2. Alternativas identificadas en la revisión sistemática.

3.2 Resultados de la entrevista exploratoria.

El componente cualitativo inicial permitió identificar percepciones clave del sector respecto al uso del agua, las prácticas operativas y las barreras para adoptar tecnologías

sostenibles. Los participantes expresaron cuatro patrones principales:

i. Problemas económicos estructurales: Se mencionaron precios bajos por pieza, márgenes reducidos y competencia desigual, lo que dificulta invertir en mejoras tecnológicas.
ii. Déficit técnico y falta de capacitación: Las empresas reportaron falta de asesoría, desconocimiento de tecnologías emergentes y limitaciones de tiempo operativo para evaluar alternativas.
iii. Percepción de desigualdad regulatoria: Los actores señalaron que existe un cumplimiento desigual de las normas, lo cual genera desventajas competitivas para quienes sí invierten en equipamiento ambiental.
iv. Preocupación por la disponibilidad de agua en la región: Los participantes reconocieron que la disponibilidad de agua está disminuyendo y que la situación puede agravarse si no se toman medidas colectivas.

Estos hallazgos cualitativos permitieron delimitar los temas incluidos posteriormente en la encuesta estructurada y proporcionaron una visión contextual del entorno operativo de las lavanderías.

3.3 Caracterización de las lavanderías encuestadas

Las diez lavanderías presentan capacidades y niveles de producción diversos. La Tabla 1 muestra la identificación anonimizada. La mayoría opera con entre 5 y 13 lavadoras industriales, rangos consistentes con regiones especializadas en mezclilla.

Tabla 1. Datos generales.

Empresa	Trabajado-res	Producción mensual	Inicio operaciones
A	51–100	200,000	2005
B	21–50	72,000	2006
C	>100	180,000	1994
D	>100	250,000	1993
E	21–50	40,000	2008
F	>20	32,000	2012
G	>20	60,000	2021
H	21–50	48,000	2010
I	>20	24,000	2019
J	21–50	40,000	2021

3.3.1. Procesos de lavado y consumo de agua

Todos los establecimientos realizan procesos húmedos convencionales: stone wash, enzimático, bleach, acid wash, PP Spray y dry process. Tres empresas (C, D y G) mencionan el uso de ozono o láser, tecnologías destacadas en la literatura por su bajo consumo hídrico (Ben Fraj & Jaouachi, 2021). La Figura 3, sintetiza los procesos reportados por cada empresa.

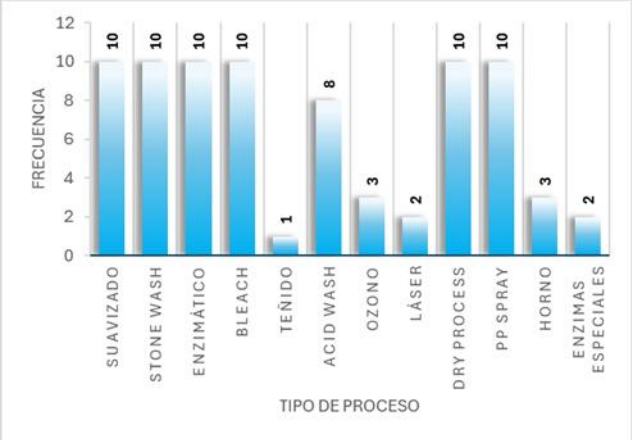


Fig. 3. Procesos realizados por cada lavandería.

En cuanto al consumo de agua, las capacidades promedio por carga oscilan entre 80 y 150 kg, con consumos de 250 a 600 litros por ciclo. Solo dos empresas reportan algún nivel de reutilización de agua (10% y 15%). La Tabla 2 presenta los valores detallados. El consumo por ciclo (250–600 L) coincide con procesos tradicionales intensivos en agua reportados en la literatura (Souza et al., 2016).

Tabla 2. Consumo de agua.

Em-presa	Lava-doras	Capaci-dad (kg)	L/ciclo	Reúso (%)	Origen del agua
A	13	150	600	10%	Pozo
B	6	120	350	0%	Mixto
C	10	120	350	15%	Pozo
D	12	150	600	0%	Pozo
E	5	120	300	0%	Pipas
F	2	150	350	0%	Pozo
G	3	150	350	0%	Mixto
H	5	120	400	0%	Pozo
I	3	80	250	0%	Mixto
J	5	110	300	0%	Pipas

3.3.2. Tratamiento de aguas residuales

Solo cuatro empresas (A, B, C, H) realizan algún tipo de tratamiento físico o químico (Tabla 3). Ninguna alcanza cobertura total y los porcentajes van del 40% al 60%. El resto carece de plantas de tratamiento. La brecha entre la literatura

y la realidad local confirma que los costos de operación siguen siendo la principal barrera para el tratamiento de efluentes.

Tabla 3. Tratamiento y limitantes.

Empresa	Tipo tratamiento	% Tratado	Motivo de no tratar más
A	Químico	60%	Costo de operación
B	Físico	–	Costo operación
C	Químico	40%	Costo de operación
H	Químico	60%	Costo operación
D, E, F, G, I, J	–	–	Inversión o costo de operación

3.3.3. Adopción de tecnologías sustentables y barreras.

Tres empresas (A, C, D) reportan uso limitado de tecnologías sustentables (ozono, enzimas especiales). Las diez mencionan una o más barreras, destacando:

- Costo de inversión (10/10)
- Falta de información técnica (9/10)
- Resistencias internas (8/10)
- Falta de apoyo institucional (9/10)

Estas barreras son consistentes con lo reportado por Nadeem et al. (2024) para pequeñas y medianas empresas textiles.

3.3.4. Percepción ambiental y normativa.

La mayoría considera que el consumo de agua en mezclilla es un problema crítico (9/10) y que existe interés en reducirlo (10/10). No obstante, el conocimiento de la normativa es parcial: solo 4 empresas reportan conocerla plenamente. Pese a ello, 10/10 consideran que las autoridades exigen controles suficientes.

3.3.5. Disposición a adoptar tecnologías.

Siete empresas estarían dispuestas a adoptar tecnologías que reduzcan hasta 50% el consumo de agua, aunque condicionadas a:

- financiamiento
- capacitación técnica
- asesoría en procesos
- incentivos gubernamentales
- mejores precios por pieza

Lo anterior coincide con conclusiones de estudios globales sobre implementación de tecnologías sostenibles.

4. CONCLUSIONES

El análisis integrado de la bibliometría, la revisión sistemática y los datos recabados en las lavanderías de mezclilla de Tehuacán evidencia una brecha significativa entre las tendencias globales en sostenibilidad y las capacidades tecnológicas actualmente implementadas en el sector local. Mientras la literatura reporta alternativas capaces de reducir hasta 70% del consumo hídrico y sistemas de tratamiento con eficiencias superiores al 80%, la realidad operativa observada muestra procesos altamente dependientes del agua, niveles mínimos de reutilización y una adopción limitada de tecnologías emergentes como ozono, láser o procesos enzimáticos avanzados.

Los resultados cualitativos revelan problemáticas estructurales que condicionan esta brecha: márgenes de operación reducidos, desconocimiento técnico, resistencias internas a modificar procesos, cumplimiento desigual de normativas y percepción generalizada de que los costos de tratamiento o modernización exceden las capacidades de inversión actuales. Al mismo tiempo, el diagnóstico muestra un consenso claro respecto a la gravedad del consumo de agua en la región y una disposición mayoritaria a adoptar tecnologías más eficientes, siempre que existan condiciones institucionales y económicas que lo hagan viable.

El análisis cuantitativo confirma estos hallazgos: la mayoría de las lavanderías mantiene consumos por ciclo que coinciden con procesos convencionales, el tratamiento de efluentes es parcial o inexistente en varias plantas y la disponibilidad de datos operativos precisos es limitada, lo que dificulta una gestión más eficiente de los recursos. Sin embargo, también se identifican fortalezas, como capacidad instalada considerable, experiencia técnica consolidada y apertura a recibir asesoría, capacitación o acompañamiento para mejorar las prácticas actuales.

En conjunto, los resultados permiten afirmar que el problema no radica en la falta de interés del sector, sino en la ausencia de mecanismos articulados que faciliten la transición hacia procesos más sustentables. Por ello, esta primera fase del proyecto constituye un diagnóstico estratégico que proporciona la base necesaria para avanzar hacia la formulación de propuestas concretas, entre ellas: desarrollo de modelos de eficiencia hídrica aplicables a las condiciones reales de la región, diseño de estrategias de reutilización de agua, evaluación técnico-económica de alternativas tecnológicas y construcción de rutas de implementación adaptadas a las capacidades de las lavanderías.

De esta manera, el estudio no solo documenta el estado actual del sector, sino que establece los cimientos para continuar con la segunda etapa del proyecto, enfocada en la elaboración de soluciones, herramientas y lineamientos que permitan reducir el consumo de agua, mejorar la operación de las plantas y contribuir a la sostenibilidad ambiental y productiva de la región de Tehuacán.

REFERENCIAS

Arenas, C.N., Vasco, A., Betancur, M. and Martínez, J.D. (2017). Removal of indigo carmine (IC) from aqueous solution by adsorption through abrasive spherical materials made of rice husk ash (RHA). *Process Safety and Environmental Protection*, 106, 224–238.

Aria, M. and Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, 11(4), 959–975.

Atav, R., Gündüz, Ö., Yaz, S., Çakan, G. and Sevgili, B. (2024). Eco-friendly ozone process for denim garments as an alternative to conventional bleaching. *Fibers and Polymers*, 25(7), 2661–2667.

Ben Fraj, A. and Jaouachi, B. (2021). Effects of ozone treatment on denim garment properties. *Coloration Technology*, 137(6), 678–688.

Hasan, S.M.M., Nahid-Ull-Islam, M., Chowdhury, M.K.H., Akter, M. and Sakib, M.S.I. (2024). Core 2.0 nebulization technique – a sustainable denim finishing approach. *Textile and Leather Review*, 7, 582–596.

Nadeem, N., Zubair, U., Javid, A., Raza, H.S., Hussain, T. and Nawab, Y. (2024). Optimization of closed-loop wet ozone process for controlled bleaching of indigo coloured apparels through central composite design. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 749–761.

Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D. et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.

Rodríguez, F.A., Mateo, M.N., Aceves, J.M., Rivero, E.P. and González, I. (2013). Electrochemical oxidation of bio-refractory dye in a simulated textile industry effluent using DSA electrodes in a filter-press type FM01-LC reactor. *Environmental Technology*, 34(5), 573–583.

Solís, M., Gil, J.L., Solís, A., Pérez, H.I., Manjarrez, N. and Perdomo, M. (2013). The sedimentation process: A simple method to diminish contaminants in textile effluents. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 585–594.

Souza, F.S., Freitas, T.K.F.S., Domingues, A.R., Pezoti, O. and Ambrosio, E. (2016). Photocatalytic activity of TiO_2, ZnO and Nb_2O_5 applied to degradation of textile wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 329, 9–17.

Uysaler, T., Altay, P. and Özcan, G. (2025). More sustainable denim fading process of two different indigo dyed denim fabrics with laser treatment. *International Journal of Clothing Science and Technology*, (ahead of print).

Zapata, S.I.N., Benites-Alfaro, E., Flores, C.G., Cabanillas, A.Z., Flores, J.V., Olivera, C.C. and Ruiz-Vergaray, M. (2021). Hydrodynamic cavitation as a clean technology in textile industrial wastewater treatment. *Chemical Engineering Transactions*, 86, 277–282.

Study and Design of a Prototype Solar Still for Saline Water Using Aluminum and CPVC

González Torres, K. E.*, Medina-García S.*, Demesa-López F.N.*, Serrano-Arellano J.*

**División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / IT de Pachuca. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo., C.P. 42080. México.*
e-mail: juan.sa@pachuca.tecnm.mx

Abstract:

This study presents the design, construction, and field performance evaluation of a low-cost solar still for saline water desalination. The prototype integrates an aluminum bottle as the absorber–evaporator and CPVC piping to channel vapor toward a glass condenser, using readily available and recycled materials. Seven-day outdoor experiments conducted in Tizayuca, Hidalgo (Mexico) under variable meteorological conditions produced between 330 and 600 mL/day of distilled water, with an average of 447 mL/day. The productivity was strongly correlated with solar irradiance and relative humidity, confirming the influence of thermal gradients between the evaporator and condenser. The estimated thermal efficiency of the system was approximately 20%, comparable to conventional single-effect solar stills without insulation. The results demonstrate that simple geometries and low-cost components can achieve competitive desalination performance, supporting the feasibility of this design as a decentralized freshwater production solution for rural or low-income communities with limited access to potable water.

Keywords: **Solar desalination; passive solar still; low-cost materials; aluminum absorber; CPVC piping; decentralized freshwater production; rural water supply.**

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para toda forma de vida y, sin embargo, cada vez más escaso. Menos del 3% del agua total del planeta es dulce y menos del 1% es accesible para el consumo humano (USGS, 2021). El resto se encuentra en océanos, glaciares o en fuentes inaccesibles. A medida que la población mundial crece y la urbanización e industrialización se intensifican, la demanda hídrica se incrementa de manera alarmante (Tony, 2020). Esta presión ha provocado que, en muchas regiones áridas y semiáridas, el acceso al agua potable se haya convertido en un problema estructural, con graves consecuencias sociales, económicas y sanitarias (UNESCO, 2023; WHO, 2022).

El déficit de agua segura afecta tanto el desarrollo económico como la calidad de vida. Según la Organización Mundial de la Salud, más de dos mil millones de personas carecen de acceso a agua potable, y millones mueren anualmente por enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera o la diarrea (WHO, 2022). Aunque los océanos cubren el 71% de la superficie terrestre y contienen el 97% de los recursos hídricos globales, su alto contenido salino los hace inapropiados para el consumo o la agricultura (Hammadi, 2020).

Por otro lado, el incremento de las actividades industriales y la descarga de efluentes ha agravado la contaminación de las fuentes naturales de agua (Tony et al., 2015), generando enormes volúmenes de aguas residuales contaminadas que requieren tratamiento previo a su vertido. En regiones áridas e industriales, como muchas zonas de México, el suministro de agua potable implica altos costos y complejidad técnica (Tony, 2021a). En contraste, el agua salobre constituye aproximadamente el 99% del agua disponible en el planeta (Damir et al., 2008).

Ante este panorama, la desalinización solar se presenta como una alternativa viable y sostenible. Los destiladores solares (solar stills) aprovechan la radiación solar para evaporar y condensar el agua, eliminando sales y contaminantes sin requerir energía eléctrica (Kabeel, 2009; Suresh & Shanmugan, 2019; Tayeb et al., 2018). Su principio de funcionamiento es simple: la radiación solar incide sobre una

cubierta de vidrio transparente, calienta una superficie absorbente —comúnmente pintada de negro—, y provoca la evaporación del agua, que posteriormente se condensa en la parte interna del vidrio y se recolecta como agua destilada (Alatawi et al., 2022).

Si bien la eficiencia de los destiladores solares tradicionales es limitada, su bajo costo, facilidad de construcción y operación los hace especialmente atractivos para comunidades rurales o con bajos recursos (Shalaby et al., 2016; Appadurai & Velmurugan, 2017; Tony, 2020a). Por ello, numerosos estudios recientes se han enfocado en mejorar su productividad mediante modificaciones en el diseño, el uso de aletas, materiales con alta conductividad térmica y optimización de la geometría del condensador (Shahin et al., 2016; Abdelgaied et al., 2022; Cardoso et al., 2022). Otros trabajos han empleado colectores solares planos, cubiertas inclinadas y materiales absorbentes reciclados para incrementar la eficiencia (Dehghan et al., 2015; Katekar & Deshmukh, 2020; Bie et al., 2019).

En América Latina, y particularmente en México, aún son escasos los estudios experimentales de campo sobre destiladores solares de bajo costo construidos con materiales locales. La evaluación de estos sistemas bajo condiciones climáticas reales puede contribuir al desarrollo de tecnologías descentralizadas de producción de agua dulce a pequeña escala, alineadas con el Objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (UN, 2021). Por ello, este trabajo presenta el diseño, construcción y evaluación de un destilador solar experimental en Tizayuca, Hidalgo (México), con el objetivo de analizar su desempeño y viabilidad como una alternativa accesible para comunidades rurales.

2. Metodología

2.1 Fundamentos teóricos

El principio de operación de un destilador solar se basa en la evaporación y condensación del agua salina mediante energía solar, proceso que replica el ciclo hidrológico natural. Este mecanismo involucra tres etapas principales:

1. Captación y absorción de energía solar**.** La radiación solar incide sobre una superficie receptora de color oscuro, que transforma la energía radiante en calor. En el presente estudio, se utilizó una botella de aluminio recubierta con pintura negro mate, debido a su alta absortancia y baja reflectividad, lo que optimiza el calentamiento del agua en su interior (Shivhare et al., 2024).
2. Evaporación del agua salina. A medida que la temperatura del fluido aumenta, la tasa de evaporación se incrementa notablemente, incluso por debajo del punto de ebullición (aprox. 60–70 °C), separando los sólidos disueltos del vapor generado.
3. Transporte y condensación del vapor. El vapor es conducido por un tubo hacia un condensador de vidrio, donde libera su calor latente y retorna a fase líquida, obteniéndose así agua destilada libre de impurezas.

La eficiencia global del sistema depende de la radiación solar incidente, la conductividad térmica de los materiales, las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento) y el diseño geométrico del dispositivo (El-Sebaii et al., 2008; Nafey et al., 2001). Estudios previos reportan producciones típicas de 0.3–0.6 $L \cdot día^{-1} \cdot m^{-2}$, valores utilizados como referencia para la validación experimental de este trabajo.

2.2 Materiales y diseño experimental

El prototipo se construyó con materiales de bajo costo y fácil disponibilidad, conformado por cuatro componentes principales:

- Evaporador solar**:** botella de aluminio (473 mL) recubierta con pintura negro mate resistente a altas temperaturas.
- Sistema de conducción**:** tubo de CPVC de ½″ (Øext 12.7 mm), seleccionado por su baja conductividad térmica y resistencia a la corrosión.
- Condensador: botella de vidrio reciclada (355 mL) tipo “Coca-Cola”, dispuesta con una inclinación para facilitar el escurrimiento del destilado.
- Recolector: recipiente plástico transparente de 1 L. (Figura 1).

Figura 1. Materiales empleados: evaporador (aluminio), CPVC, condensador (vidrio), recolector (plástico).

2.3 Procedimiento de construcción

1. Preparación del evaporador. La superficie externa del recipiente de aluminio se recubrió con pintura negro mate de alta temperatura para maximizar la absorción solar (Figura 2).

Figura 2. Pintado del recipiente de evaporación (negro mate).

2. Perforación de la tapa. Se realizó una perforación central mediante brocas de diámetro progresivo hasta permitir el acoplamiento a presión del tubo de CPVC de ½″ (Figura 3).

Figura 3. Barrenado/perforación de la tapa para acople del CPVC.

3. Corte y ensamblaje de la tubería de conducción. Se cortaron tramos de CPVC con las siguientes longitudes: 2 × 1½″, 1 × 3½″, 2 × 21⅝″ y 1 × 12⅝″. Se emplearon dos codos de 45° y una "T" de ½″, unidas con adhesivo para PVC y respetando el tiempo de curado recomendado (Figuras 4 y 5).

Figura 4. Corte de secciones de CPVC con medidas.

Figura 5. Ensamble de la tubería de CPVC con codos 45° y 'T'.

4. Integración del condensador**.** El tubo se conectó al cuello de la botella de vidrio mediante acoples roscados de PVC (1½″), sellados con cinta de teflón y adhesivo en las uniones no roscadas (Figura 6).

Figura 6. Integración de la cámara de condensación (botella de vidrio).

2.4 Ensayos experimentales

El sistema se evaluó durante siete días consecutivos en Tizayuca, Hidalgo (México), bajo condiciones atmosféricas naturales. Las pruebas se realizaron entre 08:00 y 16:00 h, empleando una solución salina de 35 g/L de NaCl. Se registraron las variables ambientales: temperatura ambiente, irradiancia solar (UV), humedad relativa y volumen de agua destilada recolectada cada día.

Los resultados experimentales se resumen en la Tabla 1, donde se observa una producción diaria entre 330 y 600 mL (promedio 447 mL/día). Los días con mayor irradiancia (días 3 y 4) registraron los valores máximos de destilado, confirmando la dependencia directa de la productividad con la radiación solar incidente.

Variable / Día	1	2	3	4	5	6	7
Temp. inicial (°C)	17	15	16	18	19	17	16
Temp. máx. (°C)	25	22	27	28	26	24	23
Temp. final (°C)	21	19	23	24	23	21	20
UV pico	9	9	10	10	8	8	8
Humedad (%)	48	78	52	50	65	60	65
Agua recolectada (mL)	470	330	520	600	490	390	360
Recargas	4	3	5	5	4	5	3
Hora de evaporación (estimada)	11:15 a.m.	11:40 a.m.	10:50 a.m.	10:40 a.m.	10:10 a.m.	11:10 a.m.	11:35 a.m.

3. Resultados

Durante los ensayos experimentales realizados en Tizayuca, Hidalgo (México), durante siete días consecutivos (08:00–16:00 h) con una solución salina de 35 g/L de NaCl, se registró una producción diaria de agua destilada entre 330 y 600 mL, con un promedio de 447 mL/día y entre 3 y 5 recargas diarias del evaporador.

La Tabla 1 resume las condiciones ambientales y los volúmenes de agua recolectada por día. Los valores más altos de producción correspondieron a los días 3 y 4 (520 y 600 mL, respectivamente), los cuales coincidieron con mayor irradiancia solar (UV = 10) y menor humedad relativa (50–52%). Este comportamiento confirma la dependencia directa entre la tasa de evaporación y la energía solar disponible, así como la influencia inversa de la humedad ambiental, que reduce el gradiente de presión de vapor entre la superficie de evaporación y la atmósfera circundante.

Eficiencia térmica (η) del destilador

Parámetro	Símbolo	Valor
Volumen destilado diario	V	447 mL = 0.447 kg/día
Calor latente de vaporización	h_{fg}	2.26× 10^6 J/kg
Área de captación solar	A	0.25 m^2
Radiación solar diaria	G	1.98×10^7 J/m^ día

$$\eta = \frac{m_{agua} + h_{fg}}{A \,.\, G}$$

$$\eta = 0.204 = 20.4\%$$

La eficiencia térmica del sistema es ≈ 20%, lo cual concuerda con el rango típico (15–25%) de los destiladores solares de un solo efecto sin aislamiento térmico (Nafey et al., 2001; El-Sebaii et al., 2008).

Esto respalda que el diseño con botella de aluminio, CPVC y condensador de vidrio logra un desempeño competitivo a pesar del uso de materiales reciclados y de bajo costo.

Discusión

Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango típico de producción reportado para destiladores solares de un solo efecto sin aislamiento térmico, con valores entre 0.3 y 0.6 $L \cdot día^{-1} \cdot m^{-2}$ (Nafey et al., 2001; El-Sebaii et al., 2008). El rendimiento promedio de 447 mL/día indica que el prototipo presenta un comportamiento térmico estable y funcional, considerando el bajo costo y la simplicidad de los materiales empleados (aluminio, CPVC y vidrio reciclado).

El análisis de correlación muestra que la irradiancia solar es el factor predominante en la eficiencia del proceso, seguida por la humedad relativa. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Shivhare et al. (2024), quienes señalaron que la magnitud del gradiente térmico entre el evaporador y el condensador determina el flujo másico de vapor. En el presente sistema, los valores pico de radiación (UV 9–10) favorecieron una rápida evaporación hacia media mañana (≈10:30–11:00 h), momento en que se alcanzó la máxima producción horaria.

Finalmente, los resultados demuestran la viabilidad técnica y económica del diseño propuesto para la producción descentralizada de agua potable. La combinación de materiales reciclados, bajo costo de implementación y rendimiento competitivo posiciona este tipo de sistemas como una solución accesible y sostenible para comunidades rurales o zonas con acceso limitado a infraestructura hídrica (Sharshir et al., 2022; Shivhare et al., 2024).

4. Conclusiones

El prototipo de destilador solar fabricado con materiales reciclados y de bajo costo (aluminio, CPVC y vidrio) demostró viabilidad técnica y operativa, alcanzando una producción diaria de entre 330 y 600 mL (promedio 447 mL/día) durante siete días de evaluación en Tizayuca, Hidalgo (México). La eficiencia térmica estimada del sistema fue de ≈20 %, valor comparable con el rango típico reportado para destiladores solares de un solo efecto sin aislamiento, lo que confirma un aprovechamiento energético competitivo considerando su diseño simple y económico.

La productividad del sistema mostró una correlación directa con la irradiancia solar y la humedad relativa, evidenciando que el gradiente térmico entre el evaporador y el condensador constituye el principal impulsor del proceso de evaporación-condensación.

Por su simplicidad constructiva, bajo costo, mantenimiento mínimo y facilidad de replicación, el prototipo representa una alternativa factible para zonas rurales o comunidades con acceso limitado a agua potable, donde la infraestructura hídrica o eléctrica es escasa.

Se identifican oportunidades de mejora en el aislamiento térmico del evaporador, el rediseño del trayecto de vapor y la optimización del proceso de condensación.

Trabajo futuro y recomendaciones. Se propone evaluar la durabilidad del sistema bajo operación prolongada, incorporar almacenamiento térmico para mejorar la estabilidad diaria y estacional de la producción, e incluir análisis de calidad del agua destilada y costo nivelado de producción. Finalmente, se sugiere adaptar el diseño a diferentes condiciones climáticas y demandas locales, reforzando su potencial como una solución descentralizada de bajo costo para la generación sostenible de agua dulce en regiones semiáridas de México.

REFERENCIAS

Abdelgaied, M., Abdulla, A. S., Abdelaziz, G. B. & Kabeel, A. E. 2022 Performance improvement of modified stepped solar distillers using three effective hybrid optimization modifications. Sustainable Energy Technologies and Assessments 51, 101936.

Alatawi I, Khaliq A, Heniegal AMA, Abdelaziz GB, Elashmawy M (2022) Tubular solar stills: recent developments and future. Sol Energy Mater Sol Cells 242:111785

Appadurai, M. & Velmurugan, V. 2017 Experimental analysis of stepped basin pyramid solar still integrated with mini solar pond. Desalination and Water Treatment 84,1–7.

Baskaran, V. & Saravanane, R. 2021 Experimental investigation on spirulina algae based thermal still for effective bio-desalination. Environmental

Nanotechnology, Monitoring & Management 15, 100434.

Bie, Y., Li, M., Chen, F., Królczyk, G., Yang, L., Li, Z. & Li, W. 2019 A novel empirical heat transfer model for a solar thermal storage process using phase change materials. Energy 168, 222–234.

Cardoso,M.K.B.,daSilva,K.S.,Silva,C.B.,deLima,G.G.C.,deMedeiros,K.M.&deLima,C.A.P.2022Low-costsolarstillwithcorrugated absorber basin for water desalination. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 44 (5), 214.

Damir, M., et al. (2008). Performance analysis of solar desalination systems in arid regions. Applied Energy, 85(10), 850–861.

Dehghan, A. A., Afshari, A. & Rahbar, N. 2015 Thermal modeling and exergetic analysis of a thermoelectric assisted solar still. Solar Energy 115, 277–288.

El-Sebaii, A. A., Ramadan, M. R. I., Aboul-Enein, S., & Salem, N. (2008). Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond. *Energy Conversion and Management*, *49*(10), 2839–2848. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.002

Gao, X., Wu, W., Meng, Z., Liu, P., Zhao, W. & Wang, X. 2017 Thermal performance of solar collector with energy storage materials and oscillating heat pipe. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 33 (16), 234–240.

Hammadi, S. H. 2020 Integrated solar still with an underground heat exchanger for clean water production. Journal of King Saud University Engineering Sciences 32 (5), 339–345.

Kabeel AE, Hamed MH, Omara ZM (2012a) Augmentation of the basin type solar still using photovoltaic powered turbulence sys tem. Desalin Water Treat 48:182–190

Kabeel AE, Khalil A, Omara ZM, Younes MM (2012b) Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still. Desalination 289:12–20

Kabeel, A. E., Omara, Z. M., & Essa, F. A. (2014). Enhancement of a modified solar still integrated with an external condenser using nanofluids: An experimental approach. *Energy Conversion and Management*, *78*, 493–498. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.013

KabeelTeamahAbdelgaiedAziz AEMAMGBA (2017) Modified pyra mid solar still with v-corrugated absorber plate and PCM as a thermal storage medium. J Cleaner Product 161:881–887

Katekar, V. P. & Deshmukh, S. S. 2020 A review on research trends in solar still designs for domestic and industrial applications. Journal of Cleaner Production 257, 120544.

Nafey, A. S., Fath, H. E. S., El-Helaby, S. O., & Soliman, A. (2001). Technical evaluation of solar distillation systems. *Desalination*, *133*(2), 175–187.

Peng, G., Xu, Z., Ji, J., Sun, S., & Yang, N. (2021). Improving the mass transfer rate and energy efficiency of solar still by enhancing the inner air circulation [Preprint]. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.04509

Peng, G., Sharshir, S. W., Wang, Y., An, M., Kabeel, A. E., Zang, J., Zhang, L., & Yang, N. (2019). Micro/nanomaterials for improving solar still and solar evaporation—A review [Preprint]. *arXiv*:1906.08461.

Shalaby, S. M., El-Bialy, E. & El-Sebaii, A. A. 2016 An experimental investigation of a v-corrugated absorber single-basin solar still using PCM. Desalination 398, 247–255.

Shivhare, M. K., Samsher, & Kumar, A. (2024). Impact of various design parameters on solar still systems performance: A review. *AQUA – Water Infrastructure,* Ecosystems *and Society*, *73*(2), 239–265. https://doi.org/10.2166/aqua.2024.290

Sharon, H., Prabha, C., Vijay, R., Niyas, A. M. & Gorjian, S. 2021 Assessing suitability of commercial fibre reinforced plastic solar still for sustainable potable water production in rural India through detailed energy-exergy-economic analyses and environmental impacts. Journal of Environmental Management 295, 113034.

Suresh C, Shanmugan S (2019) Effect of water flow in a solar still using novel materials. J Therm Anal Calorim. https:// doi. org/ 10. 1007/ s10973- 019- 08449-5

Tiwari, G. N., & Tiwari, A. K. (2008). *Solar distillation practice for water desalination systems*. Anshan; Anamaya Publishers

Tony MA (2020b) From biomass residue to solar thermal energy: the potential of bagasse as a heat storage material. Euro-Mediterra nean J Environ Integrat 5:1–9

Tony MA (2021c) Solar concentration for green environmental reme diation opportunity—international review: advances, constraints and their practice in wastewater treatment. Int J Environ Anal Chem 103(11):2568–2600

UNESCO. (2023). UN World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water.

United Nations (UN). (2021). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.

USGS. (2021). Water Science School: How much water is there on Earth?

WHO. (2022). Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2022.

System For Obtaining Water Contained in the Air

Vargas Beltran A. *, Rodríguez Gómez Y.C., Medina-García S.**, Serrano-Arellano J.**,**

** Instituto Tecnológico Superior de Las Choapas. 96980*

***División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / IT de Pachuca. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo., C.P. 42080. México.*
e-mail: juan.sa@pachuca.tecnm.mx

Abstract:

This study presents the design and preliminary evaluation of a low-cost thermoelectric prototype for atmospheric water harvesting through condensation, developed in Pachuca, Hidalgo (Mexico). The system employs a Peltier module to cool humid air below its dew point, powered by a photovoltaic panel connected to a charge controller and a 12 V battery. The prototype housing was constructed from MDF with expanded polystyrene (EPS) insulation and aluminum cladding to improve thermal efficiency. Field tests were carried out during night-time periods to take advantage of higher ambient humidity. Under typical conditions of 14 °C and 75 % relative humidity, the device achieved a maximum condensation rate of 1.4 mL h^{-1}. The main constraints observed were limited battery autonomy, inconsistent power regulation, and inefficient heat dissipation on the hot side. These limitations can be addressed by integrating deep-cycle batteries, pulse-width modulation (PWM) control, and optimized heat-sink and condensation-surface designs. Overall, the results confirm the technical feasibility of solar-powered water harvesting from air and provide a basis for future improvements aimed at enhancing efficiency and scalability for real-world applications.

Keywords: **Hybrid renewable system, solar-wind generation, portable energy station, CFD simulation, MATLAB–Simulink.**

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, más de 2,200 millones de personas carecen de acceso a agua potable segura, 4,200 millones no disponen de saneamiento adecuado y 3,000 millones no cuentan con instalaciones básicas para el lavado de manos (ONU, 2023). El acceso desigual al agua, el crecimiento poblacional, la contaminación y la variabilidad climática agravan la crisis hídrica global, afectando directamente el desarrollo sostenible. En este contexto, la búsqueda de alternativas descentralizadas y sostenibles de captación de agua se ha convertido en una prioridad científica y tecnológica.

La atmósfera terrestre contiene aproximadamente 12,900 km^3 de agua dulce, de los cuales el 98 % se encuentra en forma de vapor (FAO, 2022). Cada metro cúbico de aire puede contener entre 4 y 25 g de vapor de agua, lo que representa un recurso potencialmente aprovechable mediante tecnologías de condensación. Para su estudio se utilizan parámetros meteorológicos como la humedad absoluta, la humedad relativa, la presión de vapor y el punto de rocío, siendo este último el indicador más relevante, ya que determina la temperatura mínima a la cual el vapor de agua comienza a condensarse (Sacristán, 2011).

El fenómeno de condensación atmosférica se basa en el enfriamiento del aire hasta alcanzar el punto de rocío. En los sistemas termoeléctricos, este proceso se logra mediante el efecto Peltier, que consiste en el transporte de calor entre las uniones de dos materiales semiconductores al aplicar una corriente eléctrica. Un lado del módulo se enfría mientras el otro se calienta, generando el gradiente térmico necesario para condensar el vapor de agua presente en el aire (González, 2017). Este principio físico ha permitido desarrollar sistemas compactos, silenciosos y de bajo mantenimiento para la generación de agua a partir de la humedad ambiental.

Diversos estudios han explorado la aplicación de los módulos Peltier como tecnología sostenible para la obtención de agua atmosférica. Chávez, Espejel, Hernández y Rascón (2019) diseñaron un generador de agua alimentado por energía solar, utilizando un conjunto de módulos Peltier controlados electrónicamente. Su sistema mostró eficiencia bajo condiciones de alta temperatura y baja humedad relativa, destacando su autonomía energética y bajo costo como

ventajas para zonas rurales sin acceso a redes de agua o electricidad. De forma complementaria, Acosta y Reina (2019) implementaron un sistema de control automatizado basado en PLC e interfaz HMI, optimizando la cantidad de celdas activas y mejorando la producción de condensado. Su sistema fotovoltaico de 265 W con batería de 12 V superó en rendimiento a estudios anteriores.

Moreno y García (2016) evaluaron la viabilidad técnica del proceso de condensación termoeléctrica utilizando módulos Peltier alimentados con energía solar, destacando su potencial como alternativa descentralizada para el suministro de agua. Por su parte, Sacristán (2011) desarrolló un sistema de control del punto de rocío con software LabVIEW, que regulaba la temperatura de la cara fría del módulo en tiempo real para mantenerla en condiciones óptimas de condensación. A nivel de optimización energética, Espinosa (2017) implementó un sistema de seguimiento solar uniaxial que incrementó la radiación incidente sobre los paneles fotovoltaicos y mejoró la eficiencia global del sistema. En el ámbito térmico, González (2017) analizó el rendimiento de un sistema de enfriamiento con superficies extendidas de aluminio, determinando que la resistencia térmica de las aletas representa hasta el 83 % del total, y que el coeficiente de desempeño (COP) de la celda TEC1-24126 alcanza valores de 0.65 al disipar una carga de 101.4 W.

El presente estudio tiene como objetivo diseñar y evaluar experimentalmente un prototipo termoeléctrico autosustentable para la generación de agua atmosférica, alimentado por energía solar, que permita condensar la humedad del aire de manera eficiente y de bajo costo. Se busca ofrecer una solución técnica viable para zonas con disponibilidad limitada de agua y acceso restringido a redes eléctricas, utilizando tecnologías limpias y accesibles.

La novedad del proyecto radica en su implementación en Pachuca, Hidalgo (México), una región con altitud superior a 2400 m s. n. m., baja humedad relativa promedio (35–55 %) y temperaturas moderadas, condiciones poco exploradas en estudios de condensación atmosférica. Evaluar el desempeño del sistema en este contexto permitirá analizar la eficiencia del proceso de condensación termoeléctrica en climas semiáridos de montaña. Además, se integrará un sistema de monitoreo y control automatizado para registrar variables ambientales y de operación, fortaleciendo la innovación tecnológica del prototipo y su pertinencia regional.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño, modelado y ensamblaje del prototipo

Para el diseño del prototipo se elaboró inicialmente un bosquejo conceptual basado en los principios de la condensación atmosférica por efecto Peltier, considerando la eficiencia térmica, el aislamiento y la facilidad de manufactura. A partir de este esquema preliminar, se construyó el modelo tridimensional del sistema en el software ANSYS, con el objetivo de analizar el comportamiento térmico y optimizar la disposición de las piezas antes de su fabricación física (Figura 1).

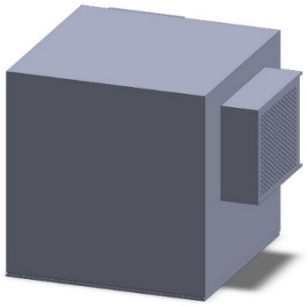


Figura 1 Modelación en Software de Ansys

El análisis computacional permitió evaluar la distribución de temperatura en las caras fría y caliente de la celda termoeléctrica, el flujo de calor hacia el disipador y la efectividad del aislamiento interno, asegurando que la cámara de condensación alcanzara temperaturas inferiores al punto de rocío del aire ambiente.

Posteriormente, se seleccionaron los materiales de acuerdo con criterios de conductividad térmica, costo, disponibilidad y resistencia mecánica. Se eligió poliestireno expandido (EPS) por su alta capacidad aislante y bajo costo, mientras que la carcasa exterior se fabricó en madera MDF, un material resistente y accesible que, al combinarse con el EPS, contribuye a conservar el gradiente térmico interior. Para mejorar la transferencia de calor y favorecer la condensación, las superficies internas se recubrieron con papel de aluminio, lo que incrementa la reflectividad térmica y la uniformidad de temperatura en la cámara de condensación.

En el ensamblaje del prototipo, al principio se colocó el ventilador modelo PMD1208PMB1-A para ayudar a disipar el calor en la cara caliente de la celda Peltier. (Figura 2).

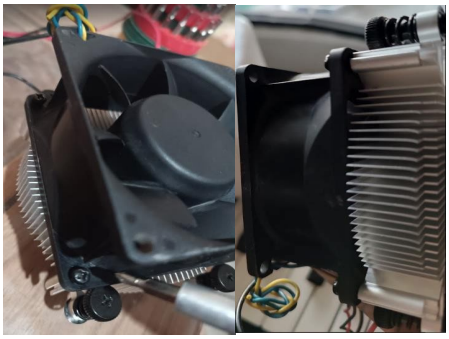


Figura 2 Ensamblaje del ventilador y disipador

Después, el ventilador se fijó firmemente al disipador con tornillos en cada esquina, para asegurar un buen contacto.

En la base del disipador se aplicó pasta térmica para mejorar la transferencia de calor desde la cara caliente de la celda.

Luego se aplicó pasta térmica a ambas caras de la celda TEC1-12706; a continuación, la cara caliente se unió al disipador principal y la cara fría a otro disipador independiente. (Figura 3).

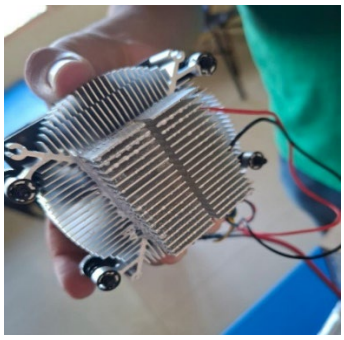


Figura 3 Muestra de los disipadores con la celda

Seguidamente, todo el conjunto se colocó dentro de una caja de madera MDF (17.9 × 17.9 × 11.5 cm). Se instaló un recubrimiento interno de poliestireno expandido (EPS), cortado a la medida para ajustarse a las paredes de la caja. A continuación, se forraron las superficies de EPS con papel de aluminio para conformar la cámara de condensación. La cara fría de la celda quedó orientada hacia el interior y unida a una placa metálica para facilitar la formación de gotas de agua. Todas las uniones se sellaron para asegurar un buen aislamiento térmico.

Por último, el sistema se alimentó con una batería recargable y, simultáneamente, se conectó a un panel fotovoltaico de 65 W y 12 V, con el fin de contar con una fuente de energía autónoma, sin depender de la red eléctrica.

Para operar de forma sostenible y proteger los componentes electrónicos, se instaló un controlador de carga entre el panel solar fotovoltaico y la batería. Este dispositivo regula el flujo de energía y evita sobrecargas, lo que alarga la vida útil del sistema y permite que la batería se recargue de manera segura. (Figura 4 y 5).

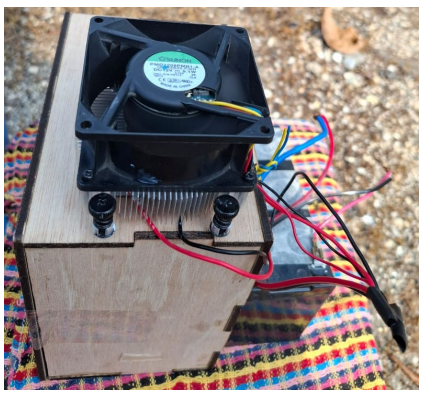


Figura 4 Prototipo funcionando

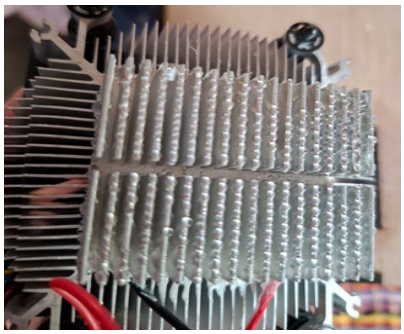


Figura 5 Captación de agua

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la fase experimental se evaluó la efectividad del prototipo generador de agua atmosférica alimentado mediante energía solar.
La efectividad se definió como la capacidad del sistema para condensar agua del aire bajo determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa, expresada en volumen de agua recolectada (mL) por unidad de tiempo (min).

El sistema fotovoltaico —integrado por un panel solar de 65 W y una batería de 12 V— permitió mantener el prototipo en operación continua durante aproximadamente 30 min por ciclo de carga, demostrando su funcionalidad autónoma en lugares sin acceso a electricidad convencional.

Se corroboró que el mayor rendimiento ocurre en horas nocturnas o de madrugada, cuando la humedad relativa (HR) supera el 65 % y la temperatura ambiente desciende por debajo de 17 °C. La batería se cargaba durante el día por medio del panel fotovoltaico y se utilizaba por la noche.

Sirve para saber si las condiciones de temperatura y humedad permitirán condensar el vapor del aire.

Fórmula de punto de rocío (aproximada para HR > 50%):

$$Td \approx T - \frac{100 - HR}{5}$$

Donde:

T = Temperatura del aire (°C)

HR = Humedad relativa (%)

Td = Punto de rocío (°C)

Ejemplo: T = 17 °C, HR = 70%

$$Td = 17 - \frac{100 - 70}{5} = 17 - 6 = 11°C$$

El punto de rocío es la temperatura a la que el aire debe enfriarse para que el vapor de agua que contiene se condense en forma líquida. En el análisis del artículo, el punto de rocío se calculó a partir de T y HR con la ecuación de Magnus–Tetens; la estimación de incertidumbre se reporta conforme a lineamientos metrológicos de CENAM (Martínez, 2007).

Así, si el aire está a 17 °C y 70 % de HR, se requiere enfriarlo hasta ≈ 11 °C o menos para que comience la condensación.

En la segunda prueba, realizada a 14 °C y 72 % de HR, se obtuvo 1.4 mL de agua en una hora de operación continua. A partir de este resultado, se estima que, en un periodo de 30 minutos, el sistema puede generar entre 0.5 y 1 mL de agua, siempre bajo condiciones ambientales similares.

Tabla 1. Operación de prototipo

Prueba	**Tiempo (min)**	**Temperatura (°C)**	**Humedad relativa (%)**	**Agua condensada (mL)**	**Fuente de energía**
1	30 min	17	70	0.5 – 1	Panel solar 65 W + batería 12 V
2	60 min	14	75	1.4	Batería 12 V

La incertidumbre de medición se estimó considerando la precisión de los sensores empleados: ±0.5 °C para temperatura y ±3 % para humedad relativa.Por propagación de incertidumbre, la incertidumbre expandida (k = 2) en el cálculo del punto de rocío fue de ±0.6 °C, y en el volumen de condensado, de ±0.1 mL, debido a la resolución del dispositivo de recolección. Estas estimaciones permiten contextualizar los resultados y respaldan la confiabilidad del comportamiento observado.

Las principales limitaciones detectadas fueron:

- el bajo rendimiento de la batería de 12 V utilizada,
- la ausencia de un inversor, y
- la imposibilidad de programar encendido/apagado automático.

Además, las pruebas se realizaron en condiciones controladas y con tiempos de evaluación limitados. Por ello, se recomienda ampliar los ensayos en diferentes estaciones del año y bajo diversos climas, así como implementar baterías de ciclo profundo y un controlador de carga más eficiente para incrementar la autonomía del sistema.

En términos generales, los resultados confirman que el prototipo es funcional y capaz de generar agua del aire mediante condensación termoeléctrica, especialmente en ambientes con alta humedad nocturna. Este comportamiento coincide con lo reportado por Chávez et al. (2019) y Moreno y García (2016), quienes observaron una mayor eficiencia de captación bajo condiciones similares.

4.CONCLUSIONES

El proyecto cumplió satisfactoriamente su propósito principal: diseñar, construir y evaluar un prototipo termoeléctrico para la recolección de agua atmosférica alimentado mediante energía solar, orientado a zonas con escasez hídrica y limitada infraestructura eléctrica.

Los resultados experimentales demostraron que el sistema es capaz de condensar el vapor de agua presente en el aire, incluso bajo las condiciones climáticas de Pachuca, Hidalgo, donde predominan temperaturas moderadas y humedad relativa variable. Se comprobó que el mayor rendimiento de condensación se alcanza durante la noche y la madrugada, cuando la humedad relativa supera el 65 % y la temperatura ambiente desciende por debajo de 17 °C.

El análisis de incertidumbre mostró una desviación de ±0.6 °C en el cálculo del punto de rocío y ±0.1 mL en el volumen de agua recolectada, valores aceptables para una evaluación experimental inicial. En promedio, el prototipo generó entre 0.5 y 1.4 mL de agua por ciclo de operación, validando el principio de condensación termoeléctrica a pequeña escala.

Se recomienda, para futuros desarrollos, optimizar el sistema energético mediante baterías de ciclo profundo e inversores de mayor eficiencia, así como ampliar las pruebas experimentales en distintas condiciones climáticas y estaciones del año.

En conjunto, el estudio evidencia que la captación de agua atmosférica mediante módulos Peltier y energía solar es técnicamente viable y ambientalmente sostenible, representando una opción prometedora para el abastecimiento de agua en regiones con estrés hídrico.

REFERENCIAS

Acosta, J., & Reina, L. (2019). Diseño de un sistema automatizado de captación de agua atmosférica mediante módulos Peltier y energía solar. Universidad Autónoma de Baja California.

Chávez, J., Espejel, M., Hernández, R., & Rascón, E. (2019). Desarrollo de un generador de agua atmosférica

alimentado por energía solar. Revista de Energías Renovables, 7(2), 45–53.

Espinosa, M. (2017). Optimización energética de un sistema de seguimiento solar uniaxial aplicado a un generador de agua autosostenible. Instituto Politécnico Nacional.

FAO. (2022). AQUASTAT: Global water resources database. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

González, P. (2017). Análisis térmico de un sistema de enfriamiento por efecto Peltier con superficies extendidas de aluminio. Universidad de Guadalajara.

Martínez, E. (2007). Humedad: definiciones y consideraciones básicas. Centro Nacional de Metrología (CENAM).

Moreno, A., & García, D. (2016). Prototipo generador de agua con módulos Peltier alimentado por energía fotovoltaica. Universidad de Sonora.

Navarro-González, F. J., Villacampa, Y., Pardo-Picazo, M. Á., & Cortés-Molina, M. (2021). Programación óptima de la carga de una microred fotovoltaica con almacenamiento. Process Safety and Environmental Protection, 149, 484–495. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.011

ONU. (2023). World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO Publishing.

Sacristán, J. (2011). Control del punto de rocío en sistemas de condensación termoeléctrica mediante LabVIEW. Universidad de Sevilla.

Soto, N. (2004). Pachuca: una ciudad con sed. Crónica histórica de la escasez de agua. Fundación Hidalguense, A.C. https://books.google.com.mx/books?id=X2cUOPOsGzgC

An approach to intelligent packaging selection using computer vision

Fragoso-Mandujano, José Armando[1]*; Luna-Aguilar, Noé Moisés[1]; Pérez-Garcia, Gilbert Francis[1]; Pérez-Pérez, Esvan de Jesus[1]; Urbina-Brito, Norberto[2]; García-Espinoza, Victor Hugo[3]

[1]Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. Carr. Panamericana 1080, Boulevares, 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chis.

[2]Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla Gutiérrez - Portillo Zaragoza Km. 21+500, Colonia Las Brisas, Suchiapa, Chiapas, C.P. 29150.

[3]Instituto Tecnológico de Sonora, Campus Navojoa, Sur. Ramón Corona 1213, Col. ITSON, C.P. 85860, Navojoa, Sonora.

*(e-mali: *jose.fm@tuxtla.tecnm.mx).*

Abstract: The complexity of the logistics chain to the final stage of products demands proper packaging of goods, allowing them to be carried with integrity to various products from the distribution center to the hands of the final consumer, guaranteeing delivery in perfect condition. However, two main problems are currently identified in this process: the first is oversizing of the packaging, which generates excessive material use and increases transportation and packaging costs. On the other hand, the second problem is the under-sizing of packaging, which causes products to be damaged during transport, resulting in economic losses due to returns or replacements. In this context, the development of a computer vision system (CVS) based on low-level image processing implemented in a controlled environment is proposed. After testing, the system achieves 80% accuracy in selecting the appropriate packaging. In the future, it is planned to implement the CVS in a continuous line of products.

Keywords: Computer vision, packaging, packaging selection, image processing, software applied to packaging logistics.

1. INTRODUCTION

Nowadays, e-commerce has been on the rise, prompting all companies to strive for an efficient distribution process (Saurabh, Singh, and Hiremath, 2022). Within logistics processes, packaging plays a fundamental role, as it is the first step in the distribution of goods. However, selecting the appropriate packaging size remains a recurring challenge for many companies (Kwon & Kwon, 2024). Frequently, larger boxes than necessary are used for certain products, which is known as oversizing the packaging. This practice generates excessive material use, increases transportation costs due to wasted space in cargo vehicles, and contributes to a greater environmental impact due to the unnecessary use of cardboard, plastics, and filler (Radu et al., 2020), as shown in Figure 1.

On the other hand, under-sizing packaging also represents a significant risk. Using smaller boxes than required can cause products to be damaged during transit, directly affecting the customer experience and resulting in economic losses due to returns or replacements. These problems are present in various areas, ranging from agri-food (Ait-Oubahou, Brecht, and Yahia, 2019) to pharmaceuticals (Benedetti et al., 2014) to industry (El-Sayed et al., 2022). Although these problems seem minimal when observed in isolation, on a large scale, they have a considerable effect on supply chain efficiency, operating costs, and logistics sustainability (Kye, Lee, and Lee, 2013).

Fig 1. Empty cardboard packaging.

Faced with this problem, the development of a computer vision system for the automatic selection of packaging is proposed, using an Intel RealSense RGB-D depth camera in conjunction with low-level digital image processing algorithms, seeking to significantly reduce cardboard waste as well as provide the consumer with certainty that the product they receive will not have any damage that affects its operation (E2M Couth, 2024). The system allows for estimating real measurements of objects in centimeters without the need for manual calibration, as it processes the information and compares the captured dimensions with a previously defined box catalog. In this way, the most appropriate packaging for each product is automatically determined, reducing manual intervention and avoiding sizing errors.

The expected results of implementing this system span various levels.

- First, a significant reduction in material waste is expected, which positively impacts direct packaging costs.
- Secondly, storage and transportation space are expected to be optimized, allowing for more compact and efficient loads.
- Third, the proposal seeks to generate a positive environmental impact by reducing the carbon footprint associated with excessive packaging and empty-space transportation.

This project represents a commitment to technological innovation in logistics, demonstrating how machine vision tools and depth cameras can be integrated into everyday processes to make them more innovative, sustainable, and profitable.

2. METHODOLOGY

2.1 *Test bench and image acquisition system*

The tests were conducted within a controlled environment. The camera was positioned in a designated area measuring 60 × 50 cm, located at a focal distance of 30 cm from the background. An Intel RealSense D435i depth camera was employed due to its provision of reliable metric data for object measurement purposes. The data acquisition process was executed in Python 3.10 utilizing the libraries pyrealsense2, OpenCV, and NumPy. Both the RGB and depth streams were captured concurrently at a resolution of 640 × 480 pixels and a frame rate of 30 frames per second. Spatial, temporal, and hole-filling filters were applied to the depth frames to mitigate noise and interpolate missing data points.

A preprocessing phase was implemented, including spatial filtering, threshold segmentation, and noise reduction. A depth threshold of 30 cm was utilized to delineate the object from the background. The system computed the dimensions of the object by extracting bounding boxes and measuring their width, height, and depth in centimeters, based on the intrinsic calibration parameters of the camera. A simplified conversion factor (1 pixel ≈ 0.1 cm) was employed for rapid measurements under controlled conditions.

The obtained dimensions were compared against a catalog of predefined box sizes (XS–XL), assigning the smallest box capable of enclosing the object. The processing pipeline and visualization interface were developed using Python, enabling real-time display of RGB and depth images, bounding boxes, and the detected dimensions.

Fig 2. Test Bench.

The RealSense camera model D435i was used, whose characteristics (as shown in Table 1) are suitable for obtaining an accurate approximation of the real dimensions of the object of interest.

Table 1. Technical Specifications of the Intel RealSense D435i

Specification	Value
Operating range (min-max)	~.3m - 3m
Depth resolution and FPS	1280 × 720 @ 30fps
Depth field of view (FoV)	H:87° V:58°
Depth technology	Active Stereoscopic

2.2 *Box capture and selection algorithm*

For the development of this work, the scheme shown in Figure 3 is proposed for the acquisition and processing of images, which is detailed below:

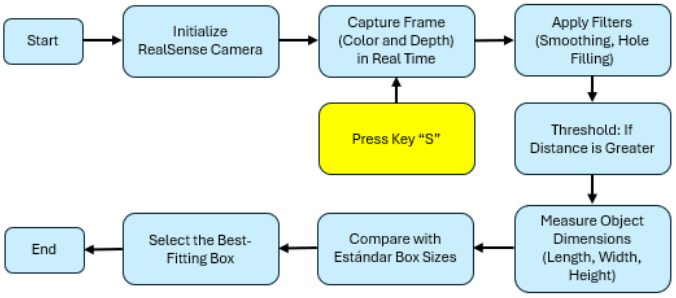


Fig 3. General Flowchart of the Proposed System

The flowchart outlines the architecture and operational pipeline of a computer vision system designed for measuring objects and subsequently classifying them by dimension. The system employs an RGB-D (Color + Depth) sensor, specifically an Intel RealSense camera, to acquire three-dimensional data from the environment. Table 2 provides detailed information about the camera settings and the proposed working algorithm configuration.

Table 2. Proposed algorithm configuration parameters

Parameter	Description	Value
Depth threshold (cm)	Distance limit for foreground segmentation	30
Bilateral filter kernel	Filter size for noise reduction	5
Frame rate	Camera capture frequency	30 fps
Resolution	Depth and RGB frames	1280×720
Classification metric	Volume matching to the box catalog	Nearest volume

The process begins with the initialization of the capture device and its corresponding software drivers. Once operational, the system proceeds to acquire frames. Each frame consists of a pair of spatially aligned data matrices: a color image (RGB) and a depth map, where the value of each pixel represents the orthogonal distance (Z axis) from the sensor plane to the corresponding point in the scene.

Raw depth data is inherently susceptible to sensor noise and artifacts such as occlusions or surfaces with low infrared reflectivity. Therefore, a preprocessing stage is implemented that includes the application of spatial filters for noise

attenuation (smoothing) and interpolation algorithms for complete data in regions with null or invalid values (hole filling).

Subsequently, a foreground segmentation algorithm is implemented employing distance thresholding. A threshold of 30 cm is established, whereby all pixels corresponding to points exceeding this distance are disregarded (their values are set to zero). This process effectively isolates the object of interest, eliminating background interference and facilitating subsequent analysis.

An object detection stage was implemented based on contour extraction using OpenCV's findContours() function, applied to the binarized foreground mask. The contour with the most significant area was selected as the object of interest. Subsequently, a bounding box was calculated using the cv2.boundingRect() function, from which pixel coordinates were mapped to real-world distances using the camera's intrinsic calibration parameters obtained via rs. intrinsics.

The 3D projection and size estimation were derived from the depth values within the bounding box using the equation:

$$Z = depth(u, v);$$
$$X = (u - c_x) \times {}^{Z}/_{f_x};$$
$$Y = (v - c_y) \times Z/f_y$$

where (u, v) are the pixel coordinates, (f_x, f_y) the focal lengths, and (c_x, c_y) the principal point?

From this ROI and the associated depth data, the system extracts the object's metric dimensions (length, width, and height) in centimeters. This calculation is based on the inverse projection of the pixels into 3D space, using the camera's previously calibrated intrinsic parameters.

The extracted dimensions are utilized as input for a higher-level application module. In this instance, it constitutes a classification system that assigns the object's volume to a discrete dimensional category (XS, S, M, L, XL), thereby automating the process of selecting suitable packaging.

In parallel, the system provides a graphical user interface (GUI) for real-time monitoring. This interface visualizes the RGB video stream, graphically overlaying the bounding box, the calculated dimensional data, and the resulting classification. The system permits user interaction, such as recording and storing data from a specific capture using a keyboard command. The operational cycle concludes with program termination and the controlled deallocation of the camera's hardware resources.

2.3 Description of test objects

To assess the performance of the computer vision system, three objects with contrasting characteristics in shape, material, and texture were selected.

- The ceramic mug, measuring 15 x 9.5 x 8 cm, is selected for its cylindrical shape, glossy surface, and subtle coloration. These characteristics facilitate the analysis of reflections and gentle curves by the algorithm.
- Water Can: Selected for its height and reflective surface, which present an additional challenge in edge detection, measuring 8.5 x 25 x 8.5 cm.
- The recognition of polygonal figures was included owing to their opaque finish and rectangular shape, serving to evaluate the algorithm's capability to identify flat surfaces with dimensions of 13 x 19 x 6 cm.

Fig 4. Test objects: a ceramic mug, a water bottle, and a recognition plaque.

2.4 Description of box sizes

For the correct selection and handling of packaging, a critical factor is knowing its dimensions. There is a category of varied materials that make up the boxes, which are [9]:

- Corrugated cardboard boxes: These are the most widely used in the industry due to their low cost, light weight, and recyclability.
- Folding cardboard boxes: made from cardboard or solid cardboard, commonly used in the food and pharmaceutical industries.
- Rigid boxes: They have greater durability and structural strength, commonly used in luxury

packaging (cosmetics, electronic items, among others).

- Reusable plastic crates: used in the automotive industry for their water and chemical resistance, as well as their secure stackability.
- Special or custom boxes: designed for specific products (bottles, fragile electronics), including internal dividers, foam, or protective materials.

Therefore, the type of box considered for the study will be the A customized one, and with this, the varied sizes that exist are presented in the following Table 3.

Table 3. Standard Commercial Box Sizes for Packaging

Size Category	Approximate Dimensions (cm)	Common Use
XS Box (Extra-Small)	20 × 15 × 10	Accessories, small spare parts
S Box (Small)	30 × 20 × 15	Books, light clothing, small electronics
M Box (Medium)	40 × 30 × 20	Shoes, food packages, kitchen utensils
L Box (Large)	50 × 40 × 30	Small appliances, folded clothing, toys
XL Box (Extra Large)	60 × 50 × 40	Medium-sized electronics, bulky clothing

All experiments were conducted under uniform lighting and positioning conditions, with the camera secured at a height of 30 cm above the surface. The Python source code and configuration files are available upon request to facilitate the replication of the results.

3. RESULTS AND/OR DISCUSSION

This section delineates the findings derived from the implementation of a computer vision system designed for automatic packaging selection. It elaborates on the accuracy and efficacy of the proposed algorithm in dimension estimation and object classification. The report includes results from tests carried out in a controlled environment, along with the system's performance across various types of objects, and examines the influence of preprocessing filters on the quality of depth data.

Figure 5 presents a visual representation generated by our system using data from a depth camera. Unlike a conventional photograph, this image does not display the actual colors of the objects but rather a distance map. The background, rendered in dark blue, represents the areas farthest from the camera, such as a wall or the end of a conveyor belt. Table 4 shows the comparison of the results obtained.

In contrast to this background, the silhouette of an object manifests in a marginally lighter blue hue, indicating its proximity. Details such as textures or labels are not discernible, as the camera exclusively captures its three-dimensional form. Significantly, the bright green rectangle framing the object is observable. This box, known in computer vision as a bounding box, has been digitally superimposed by our algorithm. Presence serves as a visual confirmation that the system has processed the image, accurately identified the object's location and boundaries, and distinguished it from the surrounding environment. Essentially, this image functions as a snapshot demonstrating the system's capacity to perceive and interpret the scene in three dimensions.

Fig 5. Capture of test objects (mug, water bottle, and recognition plaque) with bounding box and calculated dimensions.

The results obtained are presented in a clear and organized manner, utilizing tables and figures where appropriate. For articles with partial progress, the aspects under development are specified. The discussion analyzes these findings in relation to previous studies, highlighting their impact and potential implications. Furthermore, it is advisable to address the study's limitations and propose strategies for future research.

Table 4. Comparison of Ground-Truth vs. Estimated Dimensions and Selected Box Size

Object	Ground-Truth Dimensions (cm)	Estimated Dimensions (cm)	Average Accuracy (%)	Selected Box Size
Ceramic mug	15 × 9.5 × 8	14.3 × 8.5 × 9	75%	XS
Water bottle	8.5 × 25 × 8.5	8× 27 × 9.2	82%	M
Recognition plaque	13 × 19 × 6	14.2 × 21 ×5	83%	M

4. CONCLUSIONS

This document presents the development of a computer vision system (CVS) designed to address issues of oversizing and undersizing in product packaging logistics. The system incorporates a depth camera and image processing algorithms to measure objects accurately and to automatically determine the most appropriate box size. Through this methodology, the system is capable of measuring various objects and recommending the optimal box size for each. Case study.

The results obtained in the controlled testing environment are promising, demonstrating that the system can select the correct packaging with an average accuracy of 80%. However, like any technological solution, there are still challenges to overcome. Future work will focus on implementing and validating the system in a continuous production scenario, with more dynamic conditions closer to those of an industrial plant. This step will be key to verifying the system's robustness, identifying potential limitations, and, in turn, opening the door to improvements that make it scalable and adaptable to different industries.

5. REFERENCES

Ait-Oubahou, A., Brecht, J.K. and Yahia, E.M., 2019. *Packing operations*. In: Postharvest technology of perishable horticultural commodities. Woodhead Publishing, pp.311–351.

Benedetti, M., Cesarotti, V., Giuiusa, A. and Introna, V., 2014. Buffer size design in pharmaceutical packaging lines: an analytical methodology proposal and case study. *International Journal of Engineering Business Management*, 6, p.26.

E2M Couth., 2024. *Aplicaciones de visión artificial para el control de calidad del packaging: Inspección de embalajes*, 26 July 2024. Available at: https://e2mcouth.com/es-mx/blog/inspeccion-de-embalajes/ [Accessed 4 Nov. 2025].

El-Sayed, M.E., Youssef, A.W., Shehata, O.M., Shihata, L.A. and Azab, E., 2022. Computer vision for package tracking on omnidirectional wheeled conveyor: Case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 116, p.105438.

Kwon, J. and Kwon, S., 2024. Box packaging waste reduction by the largest area first fit algorithm and minimum cuboid estimation of irregular shape products. *Journal of Applied Packaging Research*, 16(1), p.1.

Kye, D., Lee, J. and Lee, K.D., (2013). The perceived impact of packaging logistics on the efficiency of freight transportation (EOT). *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43(8), pp.707–720.

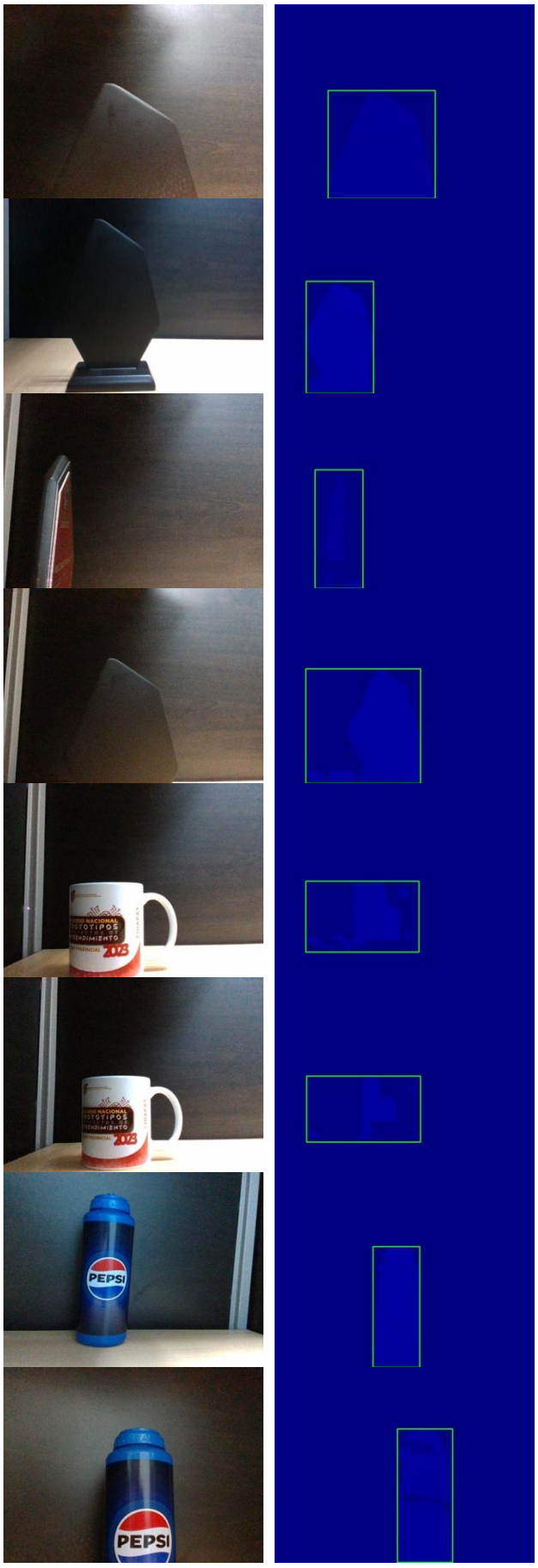
Radu, V.M., Chiriac, M., Deak, G., Pipirigeanu, M., & Izhar, T.N.T. (2020). Strategic actions for packaging waste management and reduction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 616(1), p.012019.

Saurabh, K., Singh, T., & Hiremath, R. (2022). *Computer Vision Enabled for Corrective Packaging.* In: Changing Face of E-Commerce in Asia. pp.255–275.

Su, Y., Duan, H., Wang, Z., Song, G., Kang, P., & Chen, D. (2020). Characterizing the environmental impact of packaging materials for express delivery via life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 274, p.122961.

Apendix A. tests

This section presents additional test images acquired during the preliminary evaluation of the system. These images illustrate the functionality of the acquisition and processing stages under varying lighting, distance, and object positioning conditions. The supplementary images facilitate visual verification of the robustness of the segmentation, filtering, and measurement algorithms, demonstrating consistent performance when applied to objects with diverse geometries, textures, and reflective surfaces.



Application of Artificial Intelligence and Gamification in the Process of Selection of University Scholar Candidates

Girón Colín Mónica Cristal*, Hernández Castañeda Daniela*, Gómez Aguilar José Francisco**

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: m24ce013@cenidet.tecnm.mx, daniela.hc@cenidet.tecnm.mx).*

***Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp-IICBA)/UAEM. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México. (e-mail: jose.ga@uaem.mx).*

Abstract: With the addition of artificial intelligence (AI) alongside gamification, traditional candidate selection processes, particularly for university admissions and school enrollment, have changed significantly. Artificial intelligence is used to automate the analysis of applications, including a detailed review of academic records in the context of personal experience to predict candidate success, reduce human bias, and personalize assessment effectively. Gamification is the addition of game elements, such as fun and competition, to make assessments an enjoyable, stress-free experience that fosters an inclusive and challenging environment for all participants. The synergistic union of these advanced technologies has resulted in higher levels of candidate engagement in college admissions, simply because the processes are now more interactive, adaptive, and less costly. Features such as gamified challenges, badges, and awards, as well as AI-based personalization and automation, offer a more interactive and fun experience for candidates to select profiles based on values and goals that closely match those of the institution. In addition, artificial intelligence facilitates the automation of candidate evaluation and scoring, enabling efficient and accurate processing of large volumes of information while minimizing human error. It is projected that, as TecNM/CENIDET integrates these innovative technologies, significant and measurable improvements in the quality, fairness, and diversity of the selection and admission process for graduate programs will clearly become evident.

Keywords: Artificial intelligence, gamification, candidate selection, chatbots.

1. INTRODUCCIÓN

Los medios digitales facilitan a los programas de posgrado el proceso de selección de aspirantes, permitiendo que las admisiones sean más eficientes y accesibles. Estos avances llevan a que los sistemas tradicionales evolucionen, incorporando, por ejemplo, el uso de la inteligencia artificial (IA), la cual ayuda a crear informes personalizados de manera rápida, automatizando la selección y analizando a fondo los antecedentes y experiencias de los aspirantes para predecir su éxito en un programa de posgrado, a la vez que evita prejuicios y sesgos humanos. Por su parte, la gamificación es una herramienta clave que introduce dinámicas divertidas y menos estresantes en las evaluaciones, transformando las pruebas en simulaciones atractivas y predecibles; estos ambientes reducen la ansiedad y favorecen la inclusión. Integrar estas tecnologías permite a las universidades aumentar la participación, optimizar la experiencia del aspirante y seleccionar perfiles acordes con sus objetivos y valores (La inteligencia artificial generativa en la educación: Documento de reflexión de Sra. Stefania Giannini | UNESCO, sin fecha; Lema Balla et al., 2024)

En este trabajo se hace una revisión exhaustiva de con el enfoque que se basa en la gamificación, la integración (IA), y chatbots. Es importante decir que se van a analizar las metodología y aplicaciones de los trabajos que se revisan, con el objetivo de determinar de ellas cuales son las más afectivas. Así como confrontan los desafíos de optimizar la experiencia de los aspirantes y de los procesos.

El uso de los de la IA con los chatbots de reclutamiento permiten en tiempo real la comunicación automatizada con los aspirantes, de manera que llevan a cabo mediante el uso del lenguaje natural la evaluación de los perfiles, y con ello la preselección, así como, la organización de entrevistas. Todo esto último gracias a que simula una conversación humana y utiliza lógica condicional para personalizar las preguntas según el perfil del aspirante, haciendo el proceso más ágil y humanizado; Además, se entrenan con datos y preguntas específicas para evaluar habilidades y experiencia automáticamente. La gamificación

suma métodos dinámicos y activos e interactivos que propician la interacción con juegos educativos para propiciar que los aspirantes se integren, con el fin de favorecer el aprendizaje basado en la experiencia, y también la evaluación de las competencias.

En la automatización y mejorar el proceso de selección de aspirantes tienen un rol clave, ya que su objetivo final es la programación automática de las entrevistas. Gracias a esto se logra una mejor eficiencia, ya que se traduce en un ameno óptimo y preciso de uso tanto del recurso como del tiempo.

También, en el ámbito de la educativo, los chatbots con IA se utiliza para personalizar la experiencia, ofrece soporte en el aprendizaje y promover una comunicación más cercana y personalizada.

2. METODOLOGÍA

La metodología conjunta la gamificación con el uso de la IA. Los aspirantes participan en juegos y simulaciones interactivas que evalúan habilidades especificas relacionadas con su perfil (Eras Guaman, 2024). Para llevar a cabo esta actividad, se realizan pruebas donde el rendimiento se mide mediante la captura automática de métricas involucrando puntuaciones, tiempos, decisiones y comportamientos durante las actividades gamificadas (Misael Rybnik, 2024), la IA procesa estos datos mediante algoritmos de aprendizaje supervisado otorgando resultados confiables sobre el desempeño de los aspirantes. Los chatbots con el proceso de leguaje natural facilitan la comunicación automatizada y personalizada mejorando la experiencia y calidad de la información. (Bizneo, 2024; Pandapé, 2024). Esta metodología permite realizar evaluaciones masivas simultaneas, incrementando la calidad y la objetividad del proceso de selección de aspirantes.

La IA incorpora en los sistemas de admisión y tareas administrativas acelera la gestión de solicitudes y minimiza errores manuales. Además, permite evaluaciones objetivas y basadas en datos reduciendo sesgos humanos y haciendo el proceso más justo. La interacción a través de chatbots ofrece soporte constante y recomendaciones personalizadas, además de retroalimentación automatizada para mejorar futuras postulaciones adaptando dinámicamente los métodos para garantizar transparencia, equidad en el proceso (Mauricio Acevedo Carrillo, 2025).

2.1. El impacto de la IA en la selección de aspirantes para ingreso a universidades.

La gamificación con la IA genera un impacto positivo en los procesos de selección universitaria. Elementos de juego como desafíos y recompensas fomentan la motivación y participación de los aspirantes, quienes pueden demostrar su creatividad y conocimiento en temas específicos (Adamopoulou y Moussiades, 2020)

Esta combinación permite ofrecer desafíos personalizados para cada aspirante, ajustando automáticamente la dificultad según su desempeño para conocer mejores sus competencias. Gracias a esta integración, es posible descubrir habilidades ocultas a través de pruebas rigurosas que prueban las capacidades reales de los aspirantes (Estrella Rocafuerte et al., 2025). La gamificación hace que las evaluaciones sean más personalizadas, incrementando las probabilidades de éxito en la selección. Las universidades que adoptan estas tecnologías registran mayor participación y procesos de selección más justos(Adamopoulou. E y Moussiades, 2025) En la Figura 1 se muestra el modelo automatizado para la selección de aspirantes

Figura 1. Modelo automatizado para la selección de aspirantes.

3. Inteligencia artificial: Transformando y adaptando la experiencia de los aspirantes en procesos de admisión.

La forma en que se adapta la experiencia de cada aspirante está cambiando a los procesos de admisión universitaria. En lugar de depender solo de las calificaciones, la IA permite analizar de manera integral grandes cantidades de información, incluyendo calificaciones, y otros que ayudan a identificar habilidades importantes en cada solicitud, además de reducir sesgos en la evaluación. Los procesos de admisión universitaria se transforman para brindar una experiencia integral y personalizada, dejando atrás la dependencia exclusiva de las calificaciones. La automatización y el uso de IA permite analizar grandes conjuntos de datos, reduciendo y mejorando la precisión en la selección. Para lograrlo, se implementan sistemas de mensajería instantánea con chatbots capaces de responder consultas de forma rápida y precisa, facilitando la comunicación en tiempo real con los aspirantes (Andrés Pedreño Muñoz, 2024) En la Figura 2 se muestra un ejemplo de supervisión y análisis de datos en tiempo real mediante gamificación e IA para optimizar la evaluación.

Figura 2. Supervisión de selección de aspirantes mediante gamificación y la IA con análisis de datos en tiempo real para optimizar la evaluación

3.1. Cambiando el procedimiento de selección universitaria con el uso de chatbots.

Los chatbots están automatizando y agilizando la selección de estudiantes mejorando la experiencia de los aspirantes, estos pueden resolver dudas comunes, guiar paso a paso en el proceso, enviar recordatorios personalizados y ofrecer información actualizada sobre el estado cada solicitud (Jiménez-García *et al.*, 2025). En CENIDET, en una etapa de prueba se está implementando el uso de un chatbot con reconocimiento de voz e inteligencia artificial para realizar entrevistas y evaluar a los aspirantes, esto ha permitido analizar tanto datos objetivos como emociones. Esta integración ha permitido sumar ambos tipos de información y obtener una selección más justa y precisa, reduciendo sesgos y fortaleciendo la equidad en el proceso de admisión. En la Tabla 1. se muestran los datos obtenidos del análisis de entrevista y reconocimiento de emociones implementada en aspirantes a los distintos posgrados de CENIDET. La Figura 3 muestra el análisis grafico de los resultados obtenidos.

Tabla 1. Análisis de entrevistas y reconocimiento de emociones con aspirantes a los distintos posgrados de CENIDET.

Nombre	Preselección	Entrevista	Evaluación	Emociones	Suma total
Aspirante 1	7.5	7.07	7.33	48.35	70.25%
Aspirante 2	8.5	7.98	7.79	57.7	81.97%
Aspirante 3	8.5	7.75	7.9	48.02	72.17%
Aspirante 4	8.5	7.26	7.33	67.3	90.39%
Aspirante 5	8.5	7.61	7.28	49.77	73.16%
Aspirante 6	9.5	7.61	7.32	51.05	75.48%
Aspirante 7	9.5	7.51	7.15	48.08	72.24%
Aspirante 8	8	8.23	8.05	62.21	86.49%
Aspirante 9	7	7.74	7.46	62.98	85.18%
Aspirante 10	7	8.12	7.93	67.53	90.58%
Aspirante 11	7	7	6.5	43.5	64%
Aspirante 12	7	6.9	6.3	40.3	61%
Aspirante 13	7	7	7	41	62%
Aspirante 14	7	6.9	6.5	40	60%

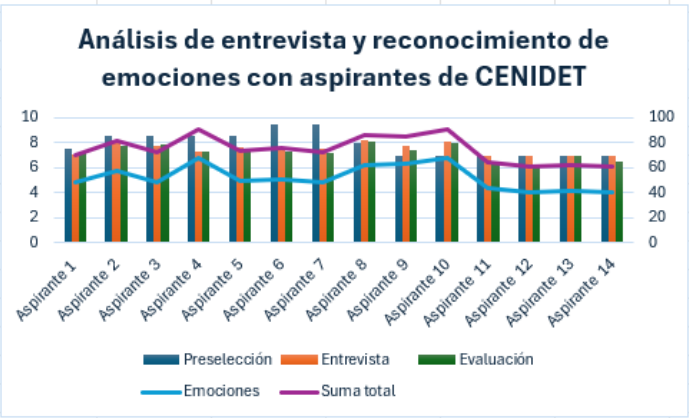


Figura 3 Análisis de resultados de entrevista y reconocimiento de emociones con aspirantes de CENIDET.

Diversos asistentes virtuales con el uso de IA están mejorando la gestión de aspirantes en universidades. Por ejemplo, Pounce, desarrollado por la Universidad Estatal de Georgia, responde con precisión a las preguntas de los aspirantes en tiempo real durante la etapa de selección. En la Universidad de Murcia, Lola asiste a los futuros alumnos ofreciéndoles información sobre requisitos y procedimientos de ingreso. Aina, de la Universidad de las Islas Baleares, ayuda a los estudiantes nuevos a resolver sus dudas durante el proceso de admisión. Isidra, en la Universidad de Alcalá, facilita el acceso a programas de posgrado de alto nivel, apoyando desde el ingreso hasta la gestión de actividades universitarias. En la Universidad Deakin, el asistente Genie proporciona soporte general que incluye horarios y actividades. Estos casos demuestran cómo la tecnología puede optimizar la gestión de admisiones, mejorando la experiencia de los aspirantes con procesos eficaces y de bajo costo para las instituciones educativas (Essel *et al.*, 2022).

4. Casos reales y de éxito del uso de la gamificación aplicada en procesos de admisión a posgrado.

Los métodos de gamificación en la admisión al posgrado utilizan varias herramientas y dinámicas, tales como contacto virtual interactivo con el objetivo de fomentar la colaboración entre aspirantes, barras de avance y retroalimentación visual que promueven la persistencia, sistemas de premios personalizados que incentivan la participación continua, cuestionarios y retos en línea a través de plataformas de diversión como Quizizz o Kahoot que nos permiten valorar de manera divertida habilidades técnicas. En resumen, estas estrategias convierten el proceso en algo más interactivo, motivador y efectivo, favoreciendo la detección de talentos y potenciando la permanencia de los aspirantes durante la selección. (Viñas, 2022). La Tabla 2 presenta diversos ejemplos donde la gamificación se ha utilizado en procesos de admisión a posgrado.

Tabla 2. Ejemplos donde la gamificación se ha utilizado en procesos de admisión a posgrado.

Universidad / Proyecto	Tecnología aplicada	Descripción breve
Tecnológico de Monterrey (FRED! Educación Amigable)	Gamificación	Plataforma gamificada para estudiantes de ingeniería que fomenta la participación y el aprendizaje personalizado.
Universidad de Alberta	Gamificación	Implementación de gamificación en clases para aumentar la retención de contenido.
Tecnológico de Monterrey (Skill Studio)	Inteligencia Artificial	Herramienta basada en IA para apoyar a profesores en educación digital.

4.1 Herramientas y métricas de la IA para evaluación gamificada.

Varias herramientas destacadas han integrado el uso de IA para mejorar la evaluación gamificada: Kahoot es una plataforma que automatiza la calificación y analiza datos como el tiempo de respuesta y la participación, generando informes detallados que ayudan a los profesores a personalizar la enseñanza y mantener el interés de los alumnos. Gradescope facilita la calificación automática con rúbricas digitales, lo que garantiza la honestidad en la evaluación al detectar similitudes en el trabajo y minimizar el sesgo humano. Socrative ofrece evaluaciones en tiempo real con análisis instantáneos de los niveles de comprensión, lo que permite ajustar las estrategias y mejorar el aprendizaje durante la actividad. Megaprofe crea automáticamente pruebas y proporciona análisis personalizados para identificar los puntos fuertes y las áreas de mejora respaldados por rúbricas configurables. Eazy Game integra simulaciones y cuestionarios interactivos con análisis avanzados del rendimiento y la participación, utilizando métricas esenciales como el tiempo de respuesta, la precisión, la progresión y la tasa de finalización Estas plataformas realizan mediciones de indicadores principales, desde la rapidez y la precisión de las respuestas hasta la persistencia y la participación en el juego. Como resultado, la IA puede ofrecer una evaluación más completa en comparación con la humana utilizando los métodos tradicionales, en relación con las necesidades educativas y profesionales actuales (López García, 2022).

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos en juegos de Kahoot aplicados en diferentes materias, tales como cálculo diferencial e integral, algoritmos, vectores y sistemas de coordenadas y números complejos. Estos resultados muestran porcentajes de respuestas correctas que varían, aproximadamente, entre 50% y 90%, lo que refleja la diversidad en el dominio de los temas según el grupo evaluado. La Figura 4 muestra la gráfica asociada, la cual ilustra claramente la variabilidad en el desempeño de los aspirantes, permitiendo visualizar de manera inmediata cuáles áreas presentan mejor compresión y cuáles requieren refuerzo. Por ejemplo, temas como cálculo y algoritmos tienden a mostrar altos porcentajes de aciertos hasta un 90%, mientras que áreas como números complejos y ciertos aspectos de vectores de física tienen porcentajes alrededor del 50% - 60%.

Esta distribución evidencia cómo las métricas automatizadas de Kahoot capturan no solo la precisión global, sino también patrones detallados de rendimiento por tema, facilitando la identificación de fortalezas y áreas de oportunidad, para los aspirantes.

En conjunto, estas mediciones permiten una evaluación gamificada más dinámica, aporta datos objetivos para ajustar estrategias educativas, motivar a los aspirantes y mejorar el aprendizaje activo.

Tabla 3. Resultados obtenidos por los aspirantes en distintos temas evaluados mediante la plataforma de Kahoot.

Rendimiento general	Total de respuestas correctas	Total de respuestas incorrecta
Calculo Diferencial e Integral	61,11 %	38,89 %
Fuerza y Deformación	50%	50%
Sistemas de Coordenadas y Números Complejos .	50%	50%
Vectores en Física	90%	10%
Números Complejos .	66.67%	33.33%
Ecuaciones Lineales y Sistemas de Ecuaciones	62.50%	37.50%
Conversión entre coordenadas polares y cartesianas, y números complejos .	52.63%	47.37%
Algoritmos	90%	10%
Matrices en matemáticas y sus operaciones básicas .	58.33%	41.67%
Mecanica de materiales	61.11%	38.89%

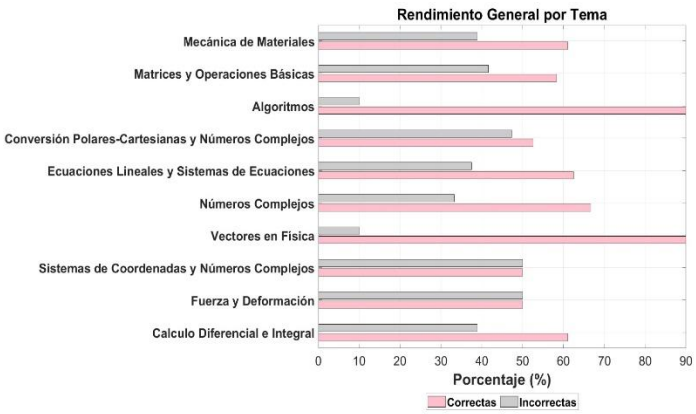


Figura 4. Desempeño promedio por tema, destacando la evaluación de los aspirantes a lo largo de las sesiones gamificadas.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se describe como el uso de la IA y la gamificación están permitiendo que las técnicas tradicionales de selección de aspirantes, especialmente dentro de las instituciones universitarias y sus procesos de admisión, realizados más precisos y detallados. Esta mejora permite ajustar la evaluación y personalizar actividades a cada uno de los aspirantes, haciendo los procesos más eficientes y atractivos. A través del uso de la IA el análisis de solicitudes puede ser automatizado para explorar información académica y experiencias personales, lo cual permite predecir quiénes son los aspirantes potencialmente exitosos eliminando sesgos humanos y personalizando las evaluaciones. La incorporación de actividades de gamificación permite crear experiencias recreativas cambiando las evaluaciones en forma de simulaciones divertidas, desafiantes y menos estresantes, adoptando una postura inclusiva y generando estímulos en el entorno. Se observa que los resultados del estudio evidencian cómo las actividades gamificadas y el uso de herramientas

basadas en IA permiten adaptar las dinámicas de evaluación al perfil y desempeño individual de los aspirantes. Esto da lugar a experiencias de selección más motivadoras, y menos estresantes, en las que se logra optimizar la participación y descubrir talentos ocultos. Además, la recopilación y análisis de datos en tiempo real facilita la toma de decisiones e incentivas mejoras continuas en los procesos de admisión.

Por tanto, la IA y la gamificación no solo eleva la eficiencia y la calidad de la evaluación, sino que también contribuye a construir procesos. La experiencia positiva registrada en las actividades propuestas refuerza la pertenencia de integrar estas tecnologías para lograr admisiones más justas y transparentes. La recopilación y análisis de datos en tiempo real permite tener mejoras continuas en los procesos y facilitan la toma de decisiones. Por tanto, se concluye que la incorporación de la IA y gamificación en procesos de admisión representa una opción que permite aumentar la eficiencia, calidad y equidad en la selección de aspirantes.

AGRADECIMIENTOS

Mónica Cristal Girón Colin agradece el apoyo brindado por el SECIHTI mediante la asignación de una beca de maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el SNII-SECIHTI.

REFERENCIAS

Adamopoulou, E. y Moussiades, L. (2020) “An Overview of Chatbot Technology”, en *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, pp. 373–383. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49186-4_31.

Adamopoulou. E y Moussiades, L. (2025) “A. M. Kassenkhan gamificacion e inteligencia artificial”, 4, pp. 3787–383. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-03049186-4_31.

Andrés Pedreño Muñoz, R.G.G.T.M.I.E. del M.P.F.J.R.S.A.T.Penalva. (2024) “La IA en las universidades retos y oportunidades”, pp. 1–161.

Essel, H.B. *et al.* (2022) “The impact of a virtual teaching assistant (chatbot) on students’ learning in Ghanaian higher education”, *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 19(1). Disponible en: https://doi.org/10.1186/s41239-022-00362-6.

Estrella Rocafuerte, A.M. *et al.* (2025) “Aplicación de la Inteligencia Artificial y gamificación para el Aprendizaje para Estudiantes con Necesidades Educativas Específicas en lenguaje”, *Revista Científica de Salud y Desarrollo Humano*, 6(2), pp. 382–419. Disponible en: https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v6i2.608.

Jiménez-García, E. *et al.* (2025) “Inteligencia Artificial y chatbots para una educación superior sostenible: una revisión sistemática”, *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 28(2). Disponible en: https://doi.org/10.5944/ried.28.2.43240.

La inteligencia artificial generativa en la educación: Documento de reflexión de Sra. Stefania Giannini | UNESCO (sin fecha). Disponible en: https://www.unesco.org/es/articles/la-inteligencia-artificial-generativa-en-la-educacion-documento-de-reflexion-de-sra-stefania (Consultado: el 19 de mayo de 2025).

Lema Balla, J.R. *et al.* (2024) “La Gamificación educativa, alternativa para la enseñanza creativa, su empleo en la educación superior en Ecuador”, *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(6). Disponible en: https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3146.

López García, N.J. (2022) “Kahoot!, Plickers And Socrative: ICT resources to assess musical content in Primary Education”, *Apertura*, 14(1), pp. 6–25. Disponible en: https://doi.org/10.32870/Ap.v14n1.2134.

Mauricio Acevedo Carrillo, N.M.C.T.P.A.L.S.L.R. (2025) “Desafíos y oportunidades de la IA en la educación superior latinoamericana”, *revista InveCom*, pp. 1–10. Disponible en: https://zenodo.org/records/15508755 (Consultado: el 8 de noviembre de 2025).

Viñas, M. (sin fecha) *Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional*. Disponible en: https://orcid.org/0000-0002-4243-1445.

Software de Recursos Humanos de Bizneo HR en Colombia y Latinoamérica (sin fecha) Bizneo.com . Disponible en: https://www.bizneo.com/es-co/?utm_campaign=ADS-Bing-BizneoHR-LAT&utm_term=bizneo&utm_content=82120128987547&utm_medium=Advertisement

Artificial Intelligence Applied To Absorption Heat Pumps

Manríquez Pardo, Gerardo*, Hernández Pérez, José A. **, Gómez Aguilar, José F., Huicochea Rodríguez, Armando**, Parrales Bahena, Arianna**, Solís Pérez , Jesús E.*****

**POSGRADO - Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias aplicadas, MOR 62209 MEX (e-mail: gerardo.manriquez@uaem.edu.mx).*

*** Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias aplicadas, MOR 62209 MEX (e-mail: {Alfredo, jose.ga, huico_chea, arianna.parrales}@uaem.mx).*

**** Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla, QUE 76230 MEX (e-mail: jsolisp@unam.mx).*

Abstract: Artificial Neural Networks (ANNs) are a powerful tool for modeling complex physical systems like absorption heat pumps. However, previous models developed using a comprehensive experimental database (with 16 input variables, which include temperatures, concentrations, and pressures, to estimate the COP) have shown acceptable, but not optimal, results. Specifically, they struggled with linearity tests, indicating a lack of the precision and reliability required for robust engineering applications. The primary objective of this work is to improve upon these benchmarks. We introduce and evaluate four different integer-order transfer functions within ANN models to enhance the prediction of the Coefficient of Performance (COP). Our results show that two of these functions, Hard Sigmoid and Relu, yield models with significantly higher accuracy, surpassing the performance of previously published work. This study demonstrates that the careful selection of a transfer function is critical for creating highly precise and reliable predictive models.

Keywords: ANN (Artificial Neural Network), transfer function, artificial intelligence, absorption heat pumps for heating

1. INTRODUCTION

In recent years, data-driven modeling has become essential for understanding and optimizing complex physical systems. Due to the limitations of traditional analytical models, Artificial Neural Networks (ANNs) have emerged as a robust and effective approach for simulating energy systems, such as absorption heat pumps. ANNs, inspired by the structure of the human brain, are computational models capable of learning highly non-linear relationships directly from experimental data. Their ability to act as "universal function approximators" makes them an exceptionally powerful tool for creating accurate predictive models where underlying physical relationships are too complex to be described by simple equations.

1.1 Artificial Intelligence

To understand the tool, it is essential first to situate it within its parent field: Artificial Intelligence (AI). AI is an expansive branch of computer science that seeks to equip computers with capabilities that mimic human intelligence, such as learning and problem-solving. Its importance in modern engineering lies in its ability to tackle problems that cannot be solved with traditional, rule-based programming. Instead of telling a computer exactly how to model a system, the essence of AI lies in teaching machines to learn patterns from vast amounts of data, allowing them to find relationships and solutions to diverse problems on their own (Russell & Norvig, 2016). This makes it the perfect approach for complex physical systems whose dynamics are not fully understood.

1.2 ANN

While AI is a vast field, this study focuses on a specific and powerful subfield known as Artificial Neural Networks (ANNs). ANNs are particularly well-suited for engineering problems because their architecture is designed to identify subtle patterns in numerical data, making them ideal for modeling physical phenomena. Inspired by the human brain.

The basic processing unit in a neural network is the neuron, which can be used in different types of architectures. Figure 2 shows the perceptron-type architecture, which is described by equations (1) and (2):

$$y = \varphi\left(\sum_{n=1}^{N} w_n x_n + \theta\right), \qquad (1)$$

$$V = \Phi^{+Y} \qquad (2)$$

Where x_n is the input to the neural network, w_n are the synaptic weights, and θ are the biases, randomly defined to expand the codomain of the activation functions (φ).
The basic structure of ANNs follows a methodology that uses fundamental processing units (neurons). These neurons are interconnected, and each one receives an input data point. Each input is assigned a "weight," which determines its influence on the model's output (Parrales et al., 2018). According to

Tablada and Torres (2020), an ANN is divided into layers, as shown in **Figure 1**:

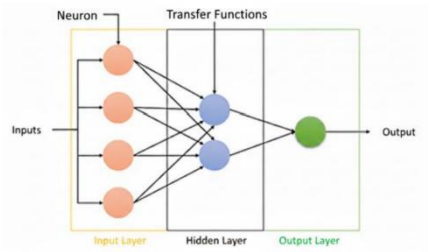


Figure 1. Structure of an ANN model. (Adapted from Cervantes-Bobadilla et al., 2021).

1. The first layer is known as the "input layer," and it contains the input parameters that are relevant to the output or results expected from the ANN.

2. The second layer, known as the "hidden layer," is where calculations are performed using the inputs.

3. The third and final layer, called the "output layer," is where the neurons that display the results are located.

1.3 Transfer Functions

Having established the layered structure of an ANN, it is crucial to understand the mathematical engine that operates within each neuron. Given that ANN models for predicting values are based on complex physical systems that a simple mathematical equation cannot represent, it is necessary to introduce equations that implement
non-linearity. The transfer function takes the linear sum and transforms it into a non-linear output, unlocking the network's ability to approximate any complex function and accurately model real-world relationships (Haykin, 2009).

1.4 Absorption Heat Pumps and Coefficient of Performance (COP)

The physical system being modeled in this study is an absorption heat pump (**Figure 2**). Unlike conventional compression-based heat pumps, absorption systems use a heat source (such as waste heat from an industrial process) to drive a thermodynamic cycle that transfers thermal energy. The system consists of four main components: a generator, a condenser, an evaporator, and an absorber.

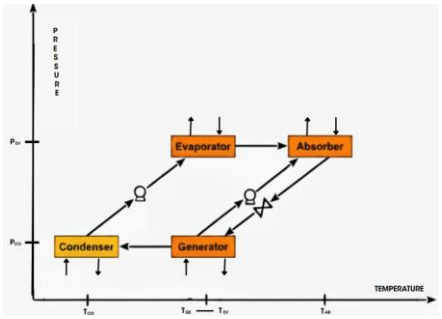


Figure 2. Schematic diagram of an absorption heat pump cycle. (Modified from Solís-Pérez et al., 2022).

The efficiency of such a system is measured by its Coefficient of Performance (COP). The COP is a dimensionless ratio that quantifies the heat pump's efficiency. A higher COP indicates a more efficient system.

2. DATABASE

The database used in this work consists of 16 input variables (temperatures in °C, concentrations in %, and pressures in in Hg) and one output variable, comprising a total of 4702 experimental tests. **Table 1** below shows the variables that will be used, along with their maximum and minimum obtained values:

Table 1. Absorption heat pump database.

Variable	Min Value	Max Value
$T_{\text{in, GE-AB}}$	71.84	91.61
$T_{\text{in, EV-AB}}$	69.34	89.93
$T_{\text{OUT, AB-GE}}$	74.46	98.27
$T_{\text{in, AB-GE}}$	73.27	92.15
$T_{\text{out, GE-AB}}$	71.84	91.61
$T_{\text{out, GE-CO}}$	72.04	83.89
$T_{\text{in, CO}}$	39.42	65.05
$T_{\text{out, CO}}$	26.75	33.79
$T_{\text{in, EV}}$	28.52	81.34
$T_{\text{out, EV-AB}}$	69.34	89.93
$X_{\text{in, AB}}$	51.66	55.33
$X_{\text{out, AB}}$	50.75	54.36
$X_{\text{in, GE}}$	50.75	54.36
X_{outGE}	53.16	56.07
P_{AB}	7	11.5
P_{GE}	20	21.1
COP	0.21	0.39

For the development and evaluation of the model, this dataset was randomly partitioned into three subsets: 70% for the training set, 15% for the validation set, and 15% for the testing set.

Prior to model training, a sensitivity analysis was conducted to identify the input variables most critical to the target variable (COP). The analysis, utilizing both Pearson correlation and a Random Forest model, revealed that $T_{\text{in, EV}}$ the evaporator inlet temperature, has the most significant impact. The next most influential variables were identified as the generator-absorber inlet temperature, $T_{\text{in, GE-AB}}$ and the generator + absorber temperature, $T_{\text{out, GE-AB}}$.

3. BACKGROUND

With the database established, the next logical step is to understand the existing body of work related to it.

2.1 Best Reported Results with Integer-Order Functions

In 2018, Conde-Gutiérrez et al. (2018) developed ANN models using the same database. At that time, models with 1 to 4 hidden neurons were evaluated using the "Tansig" and "Logsig" transfer functions. The results of that work found that the model with the 16-3-1 structure using the "Tansig"

function obtained the best scores in statistical metrics, as shown in **Table 2**.

Table 2. Best results of ANN models with integer calculus (Conde-Gutiérrez et al., 2018)

Architecture ANN	Num. of Neurons	Epoch	RMSE	R^2
16-03-01	3	1000	0.0045	0.9935

2.2 Best Reported Results with Fractional-Order Functions

In 2023, the same database was used to create new models. In this case, fractional-order transfer functions were employed, which improved upon the results of the previous models (Viera Martin, 2023). **Table 3** shows the statistical metrics.

Table 3. Best results of ANN models with fractional calculus (Viera M, 2023)

Architecture	R^2	A.F.	Inf Inter	Sup Inter	Inf. Slope	Sup. Slope
16-02-01	0.9969	Tansig-ML	0.00056	0.002	0.9939	0.9981
16-02-01	0.9965	Logsig-ML	-0.002	-0.00054	0.9982	1.0023

Consequently, the primary objective of this investigation is to introduce and evaluate different new integer-order transfer functions within ANN models. By applying these new models to the absorption heat pump database, we aim to enhance the prediction of the Coefficient of Performance (COP). These functions were selected as they represent a novel application to this specific database, and their mathematical properties are hypothesized to be highly suitable for modeling this physical system. Success will be determined by comparing the statistical performance of these new models against established benchmarks in the literature.

4. DEVELOPMENT

To address the objective of creating more efficient and reliable models, a systematic development process was established. This process involves creating new ANN models using different transfer functions. The key components of this methodology are detailed in the following subsections.

4.1 Optimization Algorithm

In the training phase of an ANN, it is essential to have an optimization algorithm that adjusts the network's parameters (weights and biases) to find the optimal values for the model. The optimization algorithm plays a crucial role in determining the convergence speed when adjusting the parameters of an ANN.

In this case, the Levenberg-Marquardt algorithm was used, as it is the most used algorithm for Feed-Forward networks. Its equation is:

$$H = J^T J, \quad (3)$$

where:

H: is the approximate Hessian Matrix

J: is the Jacobian Matrix, which contains the partial derivatives of the network's errors with respect to the parameters (weights and biases).

4.2 Variable Normalization

It is necessary to perform normalization on the database variables. For this work, all inputs and outputs were normalized to the range of 0.1 to 0.9. This specific range is chosen to prevent the saturation of certain activation functions. Activation functions that saturate, like the S-shaped Tanh or the piecewise linear hardsigmoid, have boundaries where their output flattens out. If a neuron's output falls into these flat regions, its gradient becomes almost zero. This "vanishing gradient" problem can significantly slow down or completely stall the learning process. By mapping the data to a slightly narrower range, we ensure that the neuron activations remain in a more responsive, non-saturated region, which often leads to more stable and efficient training. The equation used is:

$$x_n = (v_{\max} - v_{\min}) \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + v_{\min}, \quad (4)$$

where x_n is the normalized variable, x is the value of the variable to be normalized, $x_{\min}$and $x_{\max}$ are the minimum and maximum values that the variable to be normalized can take, respectively; while $v_{\min}$ and $v_{\max}$ represent the minimum and maximum values that the variables can take within the normalization interval, which are defined by the user.

4.3 Functions for Evaluation

The equations and corresponding behavior graphs for the functions that will be used are shown below.

4.3.1 Lecun Tanh

$$f(x) = 1.7159 \cdot \left(\frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}\right) \cdot \left(\frac{2}{3}x\right) \quad (5)$$

The Lecun Tanh function (**Eq. 5**) exhibits a classic "S-shaped" or sigmoidal curve, but it is scaled to have a steeper slope near the origin (**Figure 4**).

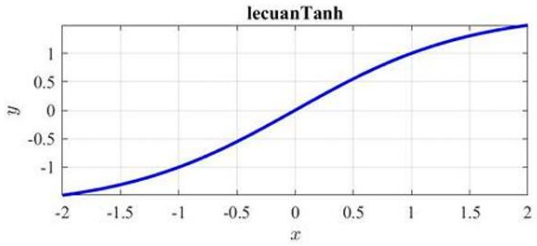


Figure 4. Behavior graph of the Lecun TanH function

4.3.2 Hard Sigmoid

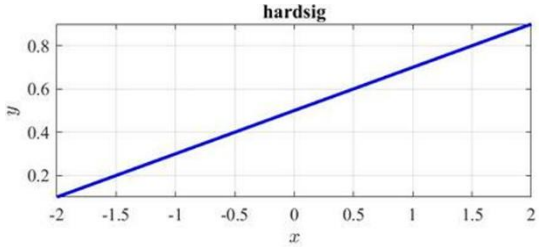


Figure 5. Behavior graph of the Hard Sigmoid function

$$f(x)\begin{cases} 0if x < -2.5 \\ 1if x > 2.5 \\ 0.2x + 0.5if -2.5 \leq x \leq 2.5 \end{cases} \quad (6)$$

The hardsigmoid function (**Eq. 6**) is a piecewise linear approximation of the sigmoid function **(Figure 5)**. Its primary advantage is computational efficiency, as it avoids the costly exponential calculations of the logistic sigmoid function, replacing them with much faster linear operations.

4.3.3 Relu

$$f(x) = max(0, x) \quad (7)$$

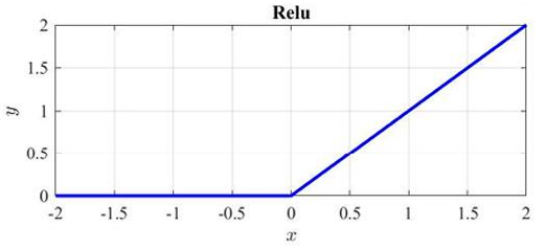


Figure 6. Behavior graph of the Relu function

The Rectified Linear Unit (Relu) function (**Eq. 7**) is fundamentally different. It is a piecewise linear function that is zero for all negative inputs and increases linearly for positive inputs (**Figure 6**). This simplicity makes it computationally very efficient.

4.3.4 Randomized Relu

$$f(x) = max(Rx, x) \quad (8)$$

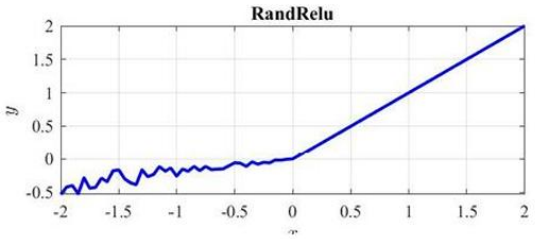


Figure 7. Behavior graph of the RandRelu function

This is a variation of Relu (**Eq. 8**) where the slope for negative inputs is a small, random value (R) rather than zero. (**Figure 7**).

4.4 Flowchart

Figure 8 provides a visual representation of the methodology used to develop, train, and evaluate each ANN model in this study.

A key component of this training methodology was the use of an early stopping criterion. The training process for each ANN was set to run for a maximum number of epochs. The patience for this criterion was set to 100,000 iterations (epochs) without improvement in the best-recorded R-value.

4.5 Statistical analysis

The evaluation of Artificial Neural Network (ANN) models requires statistical analysis to validate their effectiveness and reliability.
The statistical metrics calculated in the models studied will be the following:

Pearson's Linear Correlation (Eq. 9):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})\,(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Mean Squared Error (Eq. 10):

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (10)$$

Root Mean Squared Error (Eq. 11):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

5. RESULTS

The following figures present the behavior graphs for the models configured with two hidden neurons. **Figure 9** corresponds to the Rand Relu function, **Figure 10** to Hard Sigmoid, **Figure 11** to Lecun TanH, and **Figure 12** to Relu.

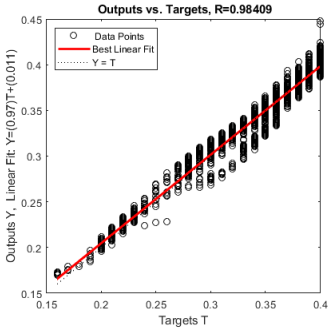


Figure 9. Linear correlation coefficient for Rand Relu, R=0.98409

The Randomized Relu function shows a good linear correlation. However, there is visible dispersion of the data points around the red line, particularly for COP values between 0.25 and 0.4.

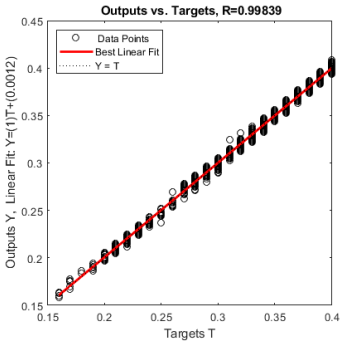


Figure 10. Linear correlation coefficient for Hard Sigmoid, R=0.99839

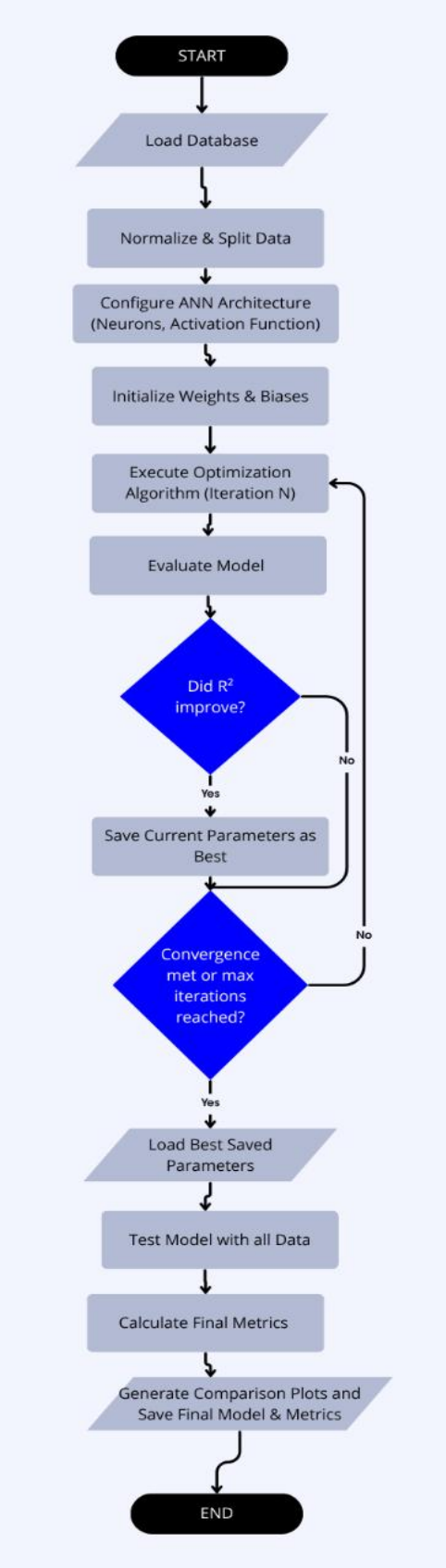


Figure 8. Flowchart from the ANN codes.

The Hard Sigmoid function yields a model that passes the linearity test. The data points form a very tight and consistent band around the ideal line, with minimal deviation across all operating conditions.

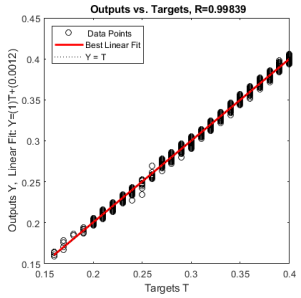


Figure 11. Linear correlation coefficient for Lecun TanH, R=0.98364

This model displays a significant issue with linearity. For low COP values (below 0.2), the predictions are quite accurate and close to the ideal line. However, as the target COP increases towards 0.4, the data points become increasingly dispersed and inaccurate.

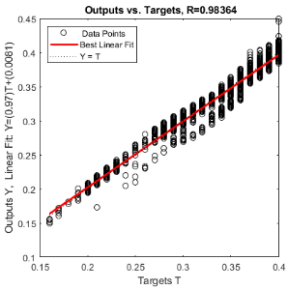


Figure 12. Linear correlation coefficient for Relu, R=0.99839

Similar to hardsigmoid, the Relu function demonstrates excellent linearity and achieves the exact same top-performing correlation coefficient of R=0.99839. The Relu model exhibits minimal dispersion, though its data point distribution differs slightly from hardsigmoid's in the central COP ranges.

ANN models with one hidden neuron (a 16-1-1 structure) were evaluated but proved non-competitive, failing to outperform established models from the literature.

Consequently, this section focuses only on the results from the more successful two-neuron configurations. **Table 4** summarizes the statistical results for the models with a 16-2-1 structure, evaluated using the entire dataset (100%).

Table 4. Evaluation of ANN models with 16-2-1 structure

Func	R^2	MSE	RMSE	Inf Inter	Sup Inter	Inf Slope	Sup Slope
Lecuh TanH	0.98364	0.00018	0.01339	0.0031	0.0095	0.9961	0.9843
Hard Sig	**0.99839**	**0.00007**	**0.00815**	**-0.0019**	**0.002**	**0.9953**	**1.0066**
Relu	**0.99839**	**0.00007**	**0.00847**	**-0.0019**	**0.0022**	**0.9947**	**1.0064**

Rand Relu	0.984 09	0.00 018	0.01 343	0.0 056	0.0 121	0.9 637	0.9822

Based on the strong linearity tests and superior statistical metrics, Hard Sigmoid and Relu are the clear winners. They achieved superior metrics (R^2, errors) and, critically, the reliable, linear behavior that prior models failed to meet.

6. ANALYSIS OF RESULTS

Based on the results obtained, it can be concluded that we successfully improved upon the last reported model using this same data. Of the transfer functions used, two—hardsigmoid and Relu—were highly successful, achieving nearly identical top-tier performance. Both models produced a correlation coefficient of R=0.99839, showing better values than those reported in the literature and, most importantly, passing the critical linearity tests. However, for LecunTanh and Randomized Relu, the same cannot be said; their use is not recommended.

7. CONCLUSIONS

The objectives of this work were successfully met by developing and rigorously evaluating ANN models for COP prediction using four transfer functions not previously tested on this specific database. The investigation yielded two highly competitive and effective functions: Hard Sigmoid and Relu. Their competitiveness is demonstrated by producing results superior to published models and passing the linearity test where prior models failed. This success suggests the underlying physics of this system is best modeled by functions exhibiting strong linear behavior combined with critical non-linearities. Conversely, models employing Lecun TanH and Randomized Relu are not recommended. Beyond predictive accuracy, the primary value of these robust models is their practical application in system optimization and real-time predictive control.

ACKNOWLEDGEMENTS

Jesús Emmanuel Solís Pérez thanks PAPIIT-DGAPA, UNAM, for the computational resources provided through projects IA102525 and TA100223.

REFERENCES

Conde-Gutiérrez, R.A., Cruz-Jacobo, U., Huicochea, A., Casolco, S.R., and Hernández, J.A. (2018). Optimal multivariable conditions in the operation of an absorption heat transformer with energy recycling solved by the genetic algorithm in artificial neural network inverse.

Viera Martin, E. (2023). Algoritmos de optimización aplicados a la solución de redes neuronales multivariables. Tesis de Doctorado, Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.

Haykin, S. (2009). Neural Networks and Learning Machines (3rd ed.). Prentice Hall.

Parrales, A., Colorado, D., Díaz Gómez, J., Huicochea, A., Álvarez, A., and Hernández, J. (2018). New void fraction equations for two-phase flow in helical heat exchangers using artificial neural networks. Applied Thermal Engineering, 149-160.

Russell, S. and Norvig, P. (2016). Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd ed.). Pearson.

Tablada, C. J. and Torres, G. A. (2020). Redes Neuronales Artificiales 1. Introducción. FaMAF.

Solís-Pérez, J.E., Hernández, J.A., Parrales, A., Gómez-Aguilar, J.F., and Huicochea, A. (2022). Artificial neural networks with conformable transfer function for improving the performance in thermal and environmental processes. Neural Networks, 152, 44–56.

Cervantes-Bobadilla, M., Hernández-Pérez, J.A., Juárez-Romero, D., Bassam, A., García-Morales, J., Huicochea, A., and Jaramillo, A. (2021). Control scheme formulation for a parabolic trough collector using inverse artificial neural networks and particle swarm optimization. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43:176.

Assessing self-regulated learning using cluster analysis applied to MSLQ data in higher education

Miguel Ángel Couoh Novelo, María Yasmín Hernández Pérez, Javier Ortíz Hernández.

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*

Abstract: This study assesses the level of self-regulated learning (SRL) in university students using cluster analysis, based on data from the Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ). The K-means algorithm was applied to eight subscales related to self-regulation: self-efficacy, metacognition, effort, organization, critical thinking, time management, elaboration, and self-assessment. The sample included 190 students from the National Institute of Technology of Mexico. The results identified two profiles: one with high self-regulation, characterized by greater self-efficacy and metacognitive control, and another with medium/low self-regulation, with deficiencies in organization and time management. These patterns allow the resulting centroids to be integrated into the student model within an intelligent tutoring system (ITS), to adapt feedback and metacognitive strategies in real time during mathematical logic instruction. Cluster analysis proves to be an effective tool for personalizing learning in intelligent educational environments.

Keywords: Self-Regulated Learning, Cluster Analysis, MSLQ, Educational Data Mining, Intelligent Tutor System.

1. INTRODUCCIÓN

En la educación superior actual, la formación de estudiantes autónomos y estratégicos se ha convertido en una prioridad ante los desafíos que plantea la sociedad del conocimiento. En este contexto, el aprendizaje autorregulado (AAR) emerge como un enfoque fundamental que promueve la capacidad del individuo para planificar, monitorear, controlar y evaluar sus propios procesos de aprendizaje (Zimmerman, 2000; Pintrich, 2000). La evidencia empírica demuestra que los estudiantes autorregulados presentan un desempeño académico superior, una mayor persistencia ante las dificultades y una mejor capacidad de transferencia del conocimiento hacia contextos nuevos (Panadero, 2017).

De manera paralela, los avances en inteligencia artificial (IA) aplicada a la educación han impulsado el desarrollo de los Sistemas Tutores Inteligentes (STI), herramientas capaces de proporcionar experiencias de aprendizaje personalizadas. Estos sistemas emulan el comportamiento de un tutor humano, adaptando la instrucción de acuerdo con las características, ritmo y necesidades del estudiante. Sin embargo, a pesar de su evolución, muchos STI aún presentan limitaciones para modelar procesos internos complejos, como la autorregulación, la motivación o la toma de decisiones metacognitivas (Azevedo et al., 2010; Winne, 2017).

Incorporar el aprendizaje autorregulado en el núcleo funcional de los STI constituye, por tanto, un paso decisivo hacia sistemas educativos más adaptativos y humanizados. En este sentido, conocer y clasificar el nivel de autorregulación de los estudiantes es un requisito esencial para desarrollar modelos de personalización precisos, capaces de ajustar dinámicamente la retroalimentación, el tipo de tarea o la dificultad de los contenidos.

El Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ), diseñado por Pintrich et al. (1991), es uno de los instrumentos más empleados para diagnosticar el nivel de autorregulación en contextos universitarios. Sus dimensiones permiten analizar tanto los aspectos motivacionales como las estrategias cognitivas y metacognitivas de los estudiantes, ofreciendo una base sólida para identificar distintos perfiles de aprendizaje.

En este trabajo se presenta un estudio empírico cuyo propósito es evaluar y clasificar el nivel de aprendizaje autorregulado en estudiantes del Tecnológico Nacional de México (TecNM), mediante el uso del análisis de clúster aplicado a las subescalas del MSLQ. A partir de los resultados, se busca generar un modelo de representación de perfiles que pueda integrarse dentro del modelo del estudiante de un sistema tutor inteligente orientado a la enseñanza de lógica matemática.

El análisis de los perfiles de autorregulación permitirá diseñar estrategias de intervención pedagógica más personalizadas, en las que el sistema tutor adapte la retroalimentación y las recomendaciones según el nivel de autorregulación del aprendiz. De este modo, el estudio no sólo aporta evidencia empírica sobre la variabilidad del aprendizaje autorregulado, sino que también ofrece una base computacional aplicable al diseño de STI adaptativos en el contexto de la educación superior.

2. MARCO TEÓRICO

El aprendizaje autorregulado (AAR) constituye un constructo central dentro de la psicología educativa contemporánea y se refiere a la capacidad del estudiante para planificar, monitorear, controlar y evaluar su propio proceso de aprendizaje (Zimmerman, 2000; Pintrich, 2000). Esta

perspectiva concibe al aprendiz como un agente activo, capaz de establecer metas, seleccionar estrategias y reflexionar sobre su desempeño, en lugar de depender exclusivamente de la instrucción externa.

Diversos autores han propuesto modelos explicativos del AAR. Entre los más influyentes destacan los de Zimmerman (2000), Pintrich (2000), Azevedo (2005) y Winne y Hadwin (1998), cuyas aportaciones han sido fundamentales tanto en la comprensión del fenómeno como en su aplicación al ámbito de los Sistemas Tutores Inteligentes (STI).

Modelo de Zimmerman:

Plantea un ciclo de tres fases, 1) Planificación: establecimiento de metas, análisis de tareas y selección de estrategias, 2) Ejecución y monitoreo: aplicación de estrategias, autorregistro y control del esfuerzo y 3) Autorreflexión: evaluación del desempeño y reajuste de estrategias.

Zimmerman enfatiza la autoeficacia como factor mediador, determinando la persistencia y la motivación del estudiante ante los retos académicos.

Modelo de Pintrich:

Estructura la autorregulación en cuatro fases (activación, monitoreo, control y reflexión) y distingue cuatro áreas de regulación: cognición, motivación, comportamiento y contexto. Este modelo ofrece una visión más amplia, al integrar componentes afectivos y ambientales en el proceso autorregulatorio.

Modelo de Azevedo:

Centrado en entornos hipermediales e interactivos, introduce la noción de andamiaje metacognitivo en tiempo real, donde el sistema guía al estudiante para aplicar estrategias efectivas de planificación, monitoreo y reflexión. Este enfoque fue operacionalizado en el sistema MetaTutor, un referente internacional en el estudio del AAR con análisis multimodal (Azevedo et al., 2010).

Modelo de Winne y Hadwin (1998):

Propone el modelo COPES (Conditions, Operations, Products, Evaluations, Standards), que descompone la autorregulación en componentes observables y computables. Este modelo es especialmente relevante para los STI, ya que facilita la representación de los procesos cognitivos mediante registros de trazas y análisis automatizados.

Estos cuatro modelos coinciden en concebir la autorregulación como un proceso dinámico, cíclico y recursivo, donde las variables cognitivas, metacognitivas y motivacionales interactúan de manera continua.

Entre los diversos instrumentos para medir el AAR, el MSLQ (Motivated Strategies for Learning Questionnaire) de Pintrich et al. (1991) es el más utilizado en contextos universitarios. Evalúa la motivación y las estrategias de aprendizaje a través de ítems agrupados en subescalas que permiten obtener un perfil detallado del nivel de autorregulación del estudiante.

En este estudio se consideraron solo las subescalas directamente relacionadas con la autorregulación cognitiva y metacognitiva, excluyendo aquellas de naturaleza contextual o afectiva. Este enfoque coincide con las recomendaciones de Azevedo y Cromley (2004), quienes señalan que los indicadores más representativos del AAR son aquellos vinculados al control de estrategias, monitoreo y reflexión

En los últimos años, la minería de datos educativos (EDM) ha permitido procesar la información derivada de instrumentos como el MSLQ para detectar patrones y perfiles de estudiantes. En particular, los métodos de análisis de clúster han mostrado su efectividad para agrupar estudiantes con comportamientos y estrategias similares (Baker y Inventado, 2014; Winne, 2017).

Este tipo de análisis permite construir perfiles de aprendizaje a partir de indicadores observables, los cuales pueden incorporarse a modelos predictivos dentro de sistemas inteligentes. Según Winne (2017), la combinación de datos autorreportados y trazas de comportamiento mejora significativamente la precisión de los modelos del estudiante.

Los Sistemas Tutores Inteligentes (STI) representan una convergencia entre la inteligencia artificial y la pedagogía. Su arquitectura general comprende cuatro módulos principales:

Módulo experto: contiene el conocimiento del dominio.

Modelo del estudiante: modela el conocimiento, habilidades y estados cognitivos del aprendiz.

Módulo tutor: gestiona la interacción pedagógica y decide cuándo y cómo intervenir.

Módulo de interfaz: comunica información entre el sistema y el usuario.

La incorporación del aprendizaje autorregulado dentro del modelo del estudiante dota al sistema de una capacidad adaptativa avanzada, permitiendo ajustar la instrucción en función del nivel de autorregulación detectado. Este enfoque, propuesto por Azevedo et al. (2010) y retomado por Lan y Zhou (2025), constituye uno de los retos actuales en el desarrollo de STI centrados en el alumno.

Así, la combinación entre la teoría del AAR y las técnicas de minería de datos educativas abre nuevas posibilidades para construir sistemas capaces de detectar, representar y fomentar la autorregulación como parte integral del proceso de enseñanza-aprendizaje

3. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño descriptivo y exploratorio orientado a identificar patrones de aprendizaje autorregulado (AAR) mediante la aplicación del análisis de clúster a los datos obtenidos del cuestionario MSLQ (Motivated Strategies for Learning Questionnaire).

El propósito del estudio fue reconocer perfiles de autorregulación y generar una base empírica que sirviera como insumo para el modelo del estudiante dentro de un sistema

tutor inteligente (STI) enfocado en la enseñanza de lógica matemática.

La muestra estuvo conformada por 190 estudiantes de nivel superior pertenecientes a diferentes campus del Tecnológico Nacional de México (TecNM): Altiplano de Tlaxcala, Puebla, Alvarado y Tizimín.

Se aplicó una versión digital adaptada del MSLQ centrada en ocho subescalas: autoeficacia, elaboración, organización, pensamiento crítico, metacognición, manejo del tiempo y ambiente, esfuerzo y autoevaluación.

Los datos fueron analizados mediante el algoritmo K-means del software WEKA. Tras evaluar modelos de dos y tres clústeres, se seleccionó la agrupación en dos perfiles por su coherencia interna y capacidad interpretativa.

4. RESULTADOS

El análisis de clúster realizado mediante el algoritmo K-means permitió agrupar a los 190 estudiantes en dos clústeres con características distintivas. Tras comparar diferentes configuraciones de agrupamiento, se seleccionó la estructura de dos clústeres por presentar el mejor equilibrio entre homogeneidad interna y heterogeneidad entre grupos.

El Clúster 1 (Alta autorregulación) se caracteriza por puntuaciones elevadas en autoeficacia (4.05), autorregulación metacognitiva (4.15) y esfuerzo (4.17), lo que indica una fuerte orientación hacia el logro, control consciente del proceso de aprendizaje y persistencia ante las dificultades. Los estudiantes de este grupo tienden a planificar sus actividades, monitorear su progreso y ajustar sus estrategias cuando enfrentan obstáculos.

En contraste, el Clúster 0 (Media/Baja autorregulación) mostró puntuaciones menores en organización (2.59), pensamiento crítico (2.85) y manejo del tiempo y ambiente (2.85). Este grupo presenta debilidades en la gestión del estudio y en la autorreflexión, manifestando un patrón de aprendizaje más reactivo que proactivo.

Tabla 1. Centroides obtenidos del análisis K-means

Subescala	Clúster 0 (Media/Baja AAR)	Clúster 1 (Alta AAR)
Autoeficacia	3.41	4.05
Elaboración	3.07	4.00
Organización	2.59	3.74
Pensamiento crítico	2.85	3.97
Metacognición	3.06	4.15
Tiempo/Ambiente	2.85	3.86
Esfuerzo	3.39	4.17
Autoevaluación	3.38	4.46

El gráfico radial muestra diferencias consistentes entre ambos clústeres: el grupo de alta autorregulación presenta valores superiores en todas las dimensiones, confirmando la validez del agrupamiento.

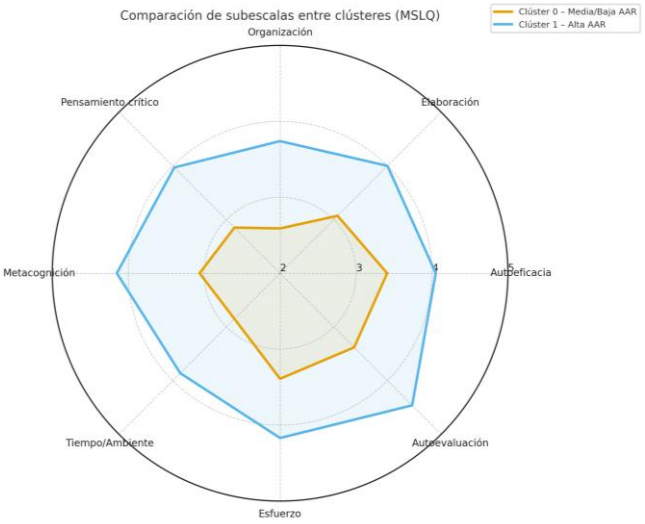


Gráfico 1. Comparación de subescalas entre clúster

Los resultados obtenidos evidencian diferencias importantes entre los perfiles autorregulatorios identificados. El grupo con alta autorregulación coincide con investigaciones que resaltan la relación entre autoeficacia, metacognición y desempeño académico (Zimmerman, 2000; Bandura, 1997).

El clúster de media/baja autorregulación revela la necesidad de implementar estrategias de andamiaje instruccional que fortalezcan las habilidades de organización, gestión del tiempo y autorreflexión, en consonancia con los planteamientos de Azevedo (2005) y Pintrich (2000).

5. DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de clúster reflejan una clara diferenciación entre los perfiles de aprendizaje autorregulado presentes en la muestra estudiada. La agrupación en dos clústeres permitió observar patrones consistentes en las dimensiones medidas por el MSLQ, lo que sugiere que los estudiantes no sólo difieren en sus niveles de motivación y esfuerzo, sino también en la manera en que gestionan y controlan sus procesos cognitivos y metacognitivos.

Desde una perspectiva aplicada, los hallazgos de este estudio tienen implicaciones directas en el desarrollo de Sistemas Tutores Inteligentes (STI). Los centroides obtenidos a partir del análisis de clúster proporcionan información valiosa para alimentar el modelo del estudiante, permitiendo que el sistema reconozca automáticamente el perfil autorregulatorio del usuario. Esta información puede utilizarse para ajustar la retroalimentación, la dificultad de las tareas y las estrategias de apoyo metacognitivo de forma personalizada. En el caso particular del proyecto en curso —un STI orientado a la enseñanza de lógica matemática—, este modelo posibilita que el sistema identifique si un estudiante requiere andamiaje

adicional o si puede avanzar hacia niveles más complejos de razonamiento lógico.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió identificar y caracterizar los distintos niveles de aprendizaje autorregulado (AAR) en un grupo de estudiantes universitarios mediante el análisis de clúster aplicado a las ocho subescalas centrales del cuestionario MSLQ. Los resultados evidencian dos perfiles predominantes: uno de alta autorregulación, asociado con mayores puntajes en autoeficacia, metacognición y esfuerzo sostenido; y otro de media/baja autorregulación, caracterizado por debilidades en organización, pensamiento crítico y manejo del tiempo.

Estos hallazgos confirman la utilidad de las técnicas de minería de datos educativos como herramienta diagnóstica para comprender la diversidad de estrategias de aprendizaje que los estudiantes emplean en contextos reales. La identificación automática de clústeres ofrece información valiosa para el diseño de modelos adaptativos capaces de ajustar la enseñanza a las necesidades cognitivas y metacognitivas de cada aprendiz.

En futuras líneas de trabajo, se plantea incorporar técnicas de análisis bayesiano y aprendizaje automático supervisado para refinar la detección de estados cognitivos y emocionales, ampliando el alcance del modelo hacia una autorregulación más integral. Además, la retroalimentación adaptativa se complementará con mecanismos de monitoreo multimodal (registros de clics, tiempos de permanencia, trazas de navegación), lo que permitirá construir perfiles de autorregulación más precisos y útiles para la toma de decisiones pedagógicas automatizadas.

En síntesis, este trabajo representa un avance significativo hacia la convergencia entre la teoría del aprendizaje autorregulado y la inteligencia artificial educativa, demostrando que el análisis de clúster puede servir como punto de partida robusto para modelar el comportamiento autorregulado en sistemas inteligentes de enseñanza.

7. REFERENCIAS

Azevedo, R. (2005). Using hypermedia as a metacognitive tool for enhancing student learning? The role of self-regulated learning. Educational Psychologist, 40(4), 199–209. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4004_2

Azevedo, R., y Cromley, J. G. (2004). Does training on self-regulated learning facilitate students' learning with hypermedia? Journal of Educational Psychology, 96(3), 523–535. https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.523

Azevedo, R., Harley, J. M., Trevors, G., D'Mello, S. K., y Graesser, A. C. (2010). An in-depth analysis of the Cognitive and Metacognitive Regulation of Learning with MetaTutor. In M. Spector, D. Ifenthaler, P. Isaías, y D. Sampson (Eds.), Proceedings of the International Conference on Cognition and Exploratory Learning in Digital Age (pp. 247–254). IADIS Press.

Baker, R. S. J. d., y Inventado, P. S. (2014). Educational Data Mining and Learning Analytics. In J. A. Larusson y B. White (Eds.), Learning Analytics: From Research to Practice (pp. 61–75). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3305-7_4

Lan, X., y Zhou, M. (2025). Artificial Intelligence in Modeling Self-Regulated Learning: From Detection to Adaptation. Computers y Education, 205, 105375. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105375

Panadero, E. (2017). A Review of Self-Regulated Learning: Six Models and Four Directions for Research. Frontiers in Psychology, 8, 422. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00422

Pintrich, P. R. (2000). The role of goal orientation in self-regulated learning. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, y M. Zeidner (Eds.), Handbook of self-regulation (pp. 451–502). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-012109890-2/50043-3

Pintrich, P. R., Smith, D. A. F., García, T., y McKeachie, W. J. (1991). A Manual for the Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ). National Center for Research to Improve Postsecondary Teaching and Learning, University of Michigan.

Winne, P. H. (2011). A cognitive and metacognitive analysis of self-regulated learning. In D. H. Schunk y B. J. Zimmerman (Eds.), Handbook of Self-Regulation of Learning and Performance (pp. 15–32). Routledge.

Winne, P. H. (2017). Learning analytics for self-regulated learning. In C. Lang, G. Siemens, A. Wise, y D. Gašević (Eds.), The Handbook of Learning Analytics (pp. 241–249). SoLAR. https://doi.org/10.18608/hla17.020

Winne, P. H., y Hadwin, A. F. (1998). Studying as self-regulated learning. In D. J. Hacker, J. Dunlosky, y A. C. Graesser (Eds.), Metacognition in Educational Theory and Practice (pp. 277–304). Lawrence Erlbaum Associates.

Zimmerman, B. J. (2000). Attaining self-regulation: A social cognitive perspective. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, y M. Zeidner (Eds.), Handbook of self-regulation (pp. 13–39). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-012109890-2/50031-7

Zimmerman, B. J., y Schunk, D. H. (2011). Handbook of Self-Regulation of Learning and Performance. Routledge.

Binocular CNN for Webcam Gaze Tracking: A Two-Protocol Comparison against Single-Eye (9-Point Calibration & Blue-Ball Trajectory).

Urquiza-Martínez Joel, González-Serna Gabriel, Magadan-Salazar Andrea, González-Franco Nimrod, Villanueva-Tavira Jonathan

Tecnológico Nacional de México, Campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490.
(e-mail: {m24ce066, gabriel.gs, andrea.ms, nimrod.gf, jonatha.vt}@cenidet.tecnm.mx).

Abstract
We compare single-eye (SET) and double-eye (DET) convolutional models for gaze tracking using webcams. A lightweight CNN processes paired left/right eye crops to predict on-screen gaze and is tested with two methods: (i) a static 9-point calibration and (ii) a dynamic "blue-ball" trajectory across corners and edges. To enhance generalization, we use data augmentation (pose, lighting, blur/noise, partial occlusion) and include a wider participant pool. Performance is measured as pixel error on the screen, angular error in degrees, and trajectory stability. When trained under the same conditions, DET consistently reduces errors and produces smoother tracking, especially in cases of asymmetric lighting and partial occlusions. Using only a standard laptop webcam and a lightweight CNN, our method achieves real-time performance without infrared sensors or proprietary licenses. This approach makes gaze estimation accessible for educational, UX, and assistive uses, particularly in low-resource settings. Overall, binocular input combined with systematic data augmentation helps overcome typical monocular failures, providing a reproducible, low-cost benchmark for webcam-based gaze estimation on consumer hardware.

Keywords: Eye-tracking, CNN, User Experience, Gaze estimation, Calibration, Webcam, HCI.

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento de la mirada es una capacidad clave para la interacción humano–computadora, la accesibilidad, la investigación del comportamiento y los medios inmersivos. Sin embargo, muchos sistemas de alta precisión siguen basándose en la reflexión córneo-pupilar (PCCR) con óptica infrarroja (IR), lo que exige entornos controlados, sensores de alta resolución y software propietario, elevando los costos de adquisición y operación y restringiendo su uso fuera de laboratorios o contextos con amplio presupuesto (*Vermeeren, et., 2010*). En contraste, los métodos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) pueden aprovechar cámaras web convencionales para recolectar datos de seguimiento ocular, reduciendo sustancialmente las barreras de entrada y facilitando su integración en entornos cotidianos (*Daniel, 2021*).

A pesar de estos avances, los sistemas con cámara web siguen siendo sensibles a factores del mundo real, como oclusiones parciales por párpados o gafas, iluminación asimétrica, micromovimientos de cabeza y variabilidad entre usuarios (Pix4d 2025). Una simplificación frecuente en trabajos previos consiste en entrenar y evaluar el modelo procesando un solo ojo (monocular) (Vidhya, et., 2025), lo que reduce la dimensionalidad de entrada, pero descarta información complementaria cuando se consideran ambos ojos (binocular). Esta restricción monocular puede amplificar el error en las condiciones más relevantes para el uso práctico (por ejemplo, en iluminación no controlada).

Este artículo aborda el problema del cuello de botella generado por el costo y el licenciamiento de sensores especializados de eye-tracking, y también aborda las limitantes del modelo monocular. Se analizó si la fusión de la información binocular en una CNN mejora la robustez y la precisión en comparación con la versión monocular, manteniendo la misma optimización y el mismo manejo de datos. Este protocolo de objetivos visuales en movimiento se ha utilizado en evaluaciones recientes con cámara web (Vidhya et al., 2025), que verifican si la predicción se mantiene dentro de un radio alrededor del estímulo en todas las regiones de la pantalla.

Para mejorar la generalización en condiciones de captura con hardware convencional, ampliamos el entrenamiento mediante técnicas de aumentación (Dilmegani, C. 2025; pose, iluminación, desenfoque/ruido, oclusión parcial) y aumentamos la diversidad de participantes. Reportamos el desempeño en píxeles sobre el plano de la pantalla y el error angular (en grados), junto con la estabilidad de la trayectoria en la prueba de objetivo móvil. En resumen, posicionamos la estimación binocular de la mirada basada en apariencia como una alternativa práctica y de baja carga de licencias frente a los sistemas IR/PCCR, conservando la accesibilidad de las cámaras web y mitigando las fallas que persisten en los enfoques monoculares con CNN. Además, al depender de un solo canal visual, estas arquitecturas son más vulnerables a iluminación asimétrica, oclusiones parciales, y reflejos en lentes o párpados.
En contraste, el enfoque propuesto introduce una arquitectura binocular que fusiona los recortes de los ojos izquierdo y derecho en un único tensor de entrada, conservando la

topología original de la CNN. Este diseño permite que el modelo aprenda relaciones complementarias entre ambos ojos sin aumentar significativamente la complejidad computacional, lo que mejora la robustez frente al ruido visual, la consistencia espacial y la precisión del punto de mirada, incluso con cámaras web de consumo.

2. METODOLOGÍA

Se implementó un diseño experimental que comparaba un modelo monocular con uno binocular para la estimación de mirada con cámara web en equipos de cómputo convencionales. La metodología está definida por: (i) un algoritmo de recolección que sincroniza estímulos en pantalla con capturas de ojos y coordenadas objetivo; (ii) la construcción del dataset con sujetos, particiones y aumentos; (iii) el entrenamiento de una CNN ligera bajo configuraciones idénticas para ambas condiciones; (iv) la descripción de dos experimentos de evaluación (calibración estática de nueve puntos y trayectoria dinámica de una esfera azul); y (v) la aplicación práctica de estos experimentos para medir error en píxeles/grados y estabilidad de trayectoria.

La Figura 1 muestra el flujo funcional general del sistema propuesto. El proceso inicia con la captura de video desde una cámara web convencional, a partir de la cual se extraen los fotogramas de entrada. A continuación, el módulo de detección facial y ocular emplea MediaPipe Face Mesh para localizar los puntos de referencia del rostro y segmentar las regiones de ambos ojos. Estas regiones se someten a una normalización geométrica, que corrige las variaciones de inclinación (yaw/pitch) y convierte la imagen a escala de grises (RGB2GRAY) para estandarizar la entrada. Finalmente, el modelo CNN procesa las imágenes oculares normalizadas y genera la predicción de la mirada en coordenadas (x, y), registrando cada salida junto con su marca de tiempo correspondiente.

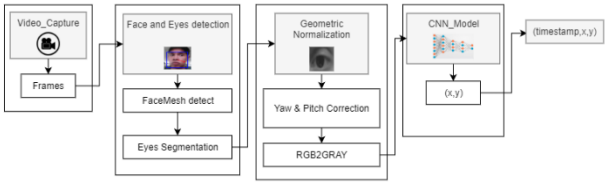


Figura 1 Flujo funcional del ambos modelos.

2.1 Algoritmo de recolección de datos.

Se diseñó un protocolo secuencial, controlado y reproducible para generar pares entrada–etiqueta destinados al entrenamiento y a la evaluación de modelos de estimación de la mirada mediante cámaras web convencionales. La pantalla se divide en una retícula de 4×4 cuadrantes (Figura 2), y en el centro de cada celda se presenta un punto de fijación durante cinco segundos, indicando al participante mantener la vista en dicho objetivo Las sesiones se realizan bajo condiciones de iluminación controlada y a una distancia aproximada de 60 cm del monitor, con el fin de homogeneizar la geometría de captura.

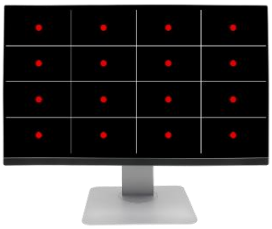


Figura 2. Calibración de 16 puntos

Materiales y software. Se empleó una cámara web integrada o USB junto con un monitor convencional.

Secuencia de estímulos. La animación recorre los 16 centros de la cuadrícula, mostrando en cada posición un punto rojo pulsante que se dibuja dinámicamente junto con las líneas de referencia. Esta presentación proporciona una guía espacial clara del plano de la pantalla y facilita la sincronización precisa con los fotogramas capturados. El sistema calcula el centro de cada celda (center_x, center_y) y lo utiliza como etiqueta objetivo de la muestra correspondiente.

Un recorrido completo de la cuadrícula tiene una duración aproximada de 80 segundos (16 celdas × 5seg), generando un conjunto sistemático y equilibrado de vistas oculares y etiquetas de pantalla bajo condiciones estables. La elección de una cuadrícula de 16 regiones y el uso de una interfaz de estímulos animados se alinean con prácticas recientes en la estimación de la mirada mediante cámaras web, donde la cuadrícula garantiza una cobertura espacial homogénea del display y la animación permite una evaluación estandarizada y reproducible.

2.2 Dataset.

El conjunto de datos se estructuró por participante para evitar mezclas indeseadas entre sujetos y facilitar particiones limpias. Para cada participante, se almacenaron por separado las capturas del ojo izquierdo y del ojo derecho (Figura 3), y dentro de cada ojo se organizaron las muestras según los 16 cuadrantes de una rejilla 4×4 que se mostró en pantalla durante la adquisición.

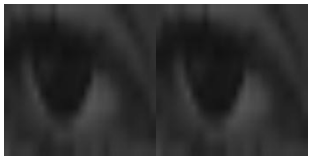


Figura 3. Segmentación de la imagen en ambos ojos 256x256 px.

Tras aplicar aumentos de datos controlados (rotaciones leves, zoom moderado, variaciones de iluminación, desenfoque y ruido), se conformó un corpus robusto que equilibra la distribución por celdas y reduce el riesgo de sobreajuste a individuos o condiciones específicas (Murel, J., et al., 2025) (Figura 4).

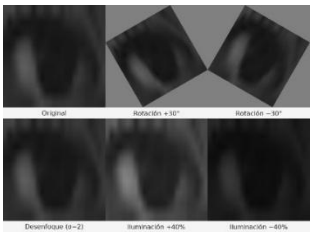


Figura 4. Transformaciones aplicadas para el aumento de datos.

La extracción de regiones oculares constituyó el núcleo del preprocesamiento. En cada fotograma, se estimaron los landmarks faciales con MediaPipe Face Mesh y, a partir del subconjunto correspondiente a cada ojo, se trazó una máscara poligonal precisa. Con esta referencia se calculó una región de interés (ROI) con un margen de seguridad que evita recortar párpados o pestañas. Cada ROI se extrajo del fotograma original, se redimensionó a 256×256 píxeles y se convirtió a escala de grises para normalizar la apariencia entre sujetos y condiciones de iluminación. Durante la carga de datos, los valores se normalizaron al rango [0, 1] dividiendo por 255. Cuando la variante binocular lo requería, las imágenes de ambos ojos se apilaban como dos canales en un único tensor, preservando la arquitectura base de la CNN y enriqueciendo la señal visual disponible. Para reforzar la calidad del conjunto, se registraron marcas de tiempo y banderas de detección por fotograma, y se descartaron automáticamente las muestras con parpadeo, pérdida de landmarks o desalineaciones iniciales tras el cambio de cuadrante.
Las particiones del conjunto de datos se realizaron por participante (train/val/test) para evitar la fuga de información entre conjuntos y evaluar la capacidad de generalización interindividual.

2.3 Entrenamiento.

El entrenamiento se implementó en TensorFlow/Keras bajo dos condiciones equivalentes: un modelo monocular (SET) y un modelo binocular (DET). Ambas variantes comparten la misma arquitectura base; la diferencia radica únicamente en la forma de entrada: una imagen de un solo ojo (1 canal) o la combinación de ambos ojos apilados como dos canales (2 canales).
En cada caso, la red recibe imágenes en escala de grises de 256×256 píxeles y produce como salida dos valores que representan las coordenadas de la mirada (x, y)sobre el plano de la pantalla. La decisión de apilar las imágenes oculares en el caso binocular permite conservar la topología del modelo y garantizar una comparación equitativa entre condiciones, de modo que cualquier mejora observada se atribuya exclusivamente a la información adicional del canal binocular.

2.3.1 Arquitectura de la red.

El modelo CNN (Figura 5) se compone de tres bloques convolucionales (Conv–ReLU–MaxPooling) seguidos de cuatro capas densas y una capa de salida lineal. Cada bloque convolucional utiliza filtros de tamaño 3×3 con 32, 64 y 128 núcleos respectivamente, seguidos de operaciones de max pooling 2×2 que reducen la dimensionalidad espacial y promueven la invariancia local. Posteriormente, la capa Flatten transforma los mapas de características en un vector unidimensional que alimenta las capas densas de 512, 256, 128 y 64 neuronas, todas con activación ReLU.
La capa final de salida lineal contiene dos neuronas que generan las coordenadas predichas $(\hat{x}, \hat{y})$de la mirada.
Durante el entrenamiento, se utilizó el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 0.001, un lote de 32 muestras y un máximo de 50 épocas. La función de pérdida seleccionada fue el error cuadrático medio (MSE), idónea para tareas de regresión continua.

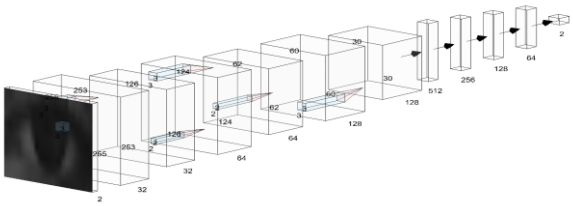


Figura 5. Arquitectura de CNN propuesta.

Antes de cada iteración, las imágenes oculares se normalizan dividiendo los valores de píxel por 255 para mantenerlos en el rango [0, 1]. Además, se aplicaron aumentos de datos (rotaciones leves, variaciones de iluminación, desenfoque y oclusión parcial) para fortalecer la generalización del modelo en condiciones reales.
Se mantuvieron los hiperparámetros para que la comparación entre ambos modelos se realizara bajo las mismas condiciones (Tabla 1).

Tabla 1 Hiperparámetros del entrenamiento de ambos modelos.

Hiperparámetros	SET	DET
Image_height	256px	256px
Image_width	256px	256px
Num_channels	1 channel	2 channels
Epoch	50 epoch	50 epoch
Batch_size	32	32
Optimizer	Adam ((η=0.001)	Adam ((η=0.001)
Loss function	MSE	MSE

2.4 Descripción de los experimentos para la evaluación de los modelos.

Para cuantificar el desempeño de las variantes monocular y binocular bajo condiciones de captura y preprocesamiento idénticas (TensorFlow/Keras), definimos dos protocolos complementarios (Novák, J. et al., 2024). El primero, estático, busca muestrear de forma uniforme el plano de la pantalla para estimar la precisión puntual; el segundo, dinámico, simula un escenario de seguimiento continuo para evaluar la estabilidad temporal. En ambos casos, el generador de estímulos queda sincronizado con el bucle de adquisición por *frame*, de modo que cada imagen de los ojos se asocia a la coordenada exacta del objetivo en pantalla. Las métricas principales son la distancia euclidiana media (MED) en píxeles y el error angular en grados; en el protocolo dinámico, añadimos medidas de estabilidad de la trayectoria (p. ej., RMSE a lo largo del recorrido y porcentaje de muestras dentro de un radio de tolerancia).

2.4.1 Experimento 1: Calibración a 9 puntos (estático)

La prueba consistió en presentar nueve puntos fijos distribuidos equitativamente en una rejilla 3×3 sobre la pantalla (figura 6). Cada usuario fija la mirada en el punto activo durante tres segundos; al concluir el intervalo, el sistema avanza automáticamente al siguiente estímulo. Este procedimiento genera una matriz densa y bien distribuida de pares (ojos, coordenadas), adecuada para evaluar la precisión espacial en distintas regiones del plano visual. A 60 fps, se capturan ≈300 fotogramas por punto, para un total de ≈2700 por sesión. Con estos datos se calculan la MED y el error angular por punto y el promedio global; adicionalmente, se reportan la dispersión (Desviación estándar) y los mapas de calor de error para identificar zonas donde el modelo tiende a degradarse (p. ej., esquinas o bordes).

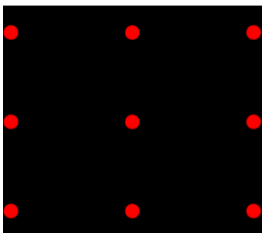


Figura 6. Experimento de calibración a 9 puntos.

2.4.2 Experimento 2: Bola Azul.

El segundo experimento consistió en una secuencia dinámica en la que una esfera azul se desplazó de forma constante, recorriendo la periferia completa de la pantalla en el sentido de las manecillas del reloj. El recorrido inicia en la esquina superior izquierda y avanza secuencialmente hacia las demás esquinas (Figura 7).

Esta prueba se diseñó para simular una situación más cercana al comportamiento natural de la mirada del usuario, en la que esta se desplaza de manera fluida, en contraste con los puntos fijos de la calibración estática de 9 puntos. El objetivo principal fue evaluar la estabilidad del seguimiento ocular y la capacidad de los modelos para mantener una estimación precisa durante movimientos oculares continuos y prolongados.

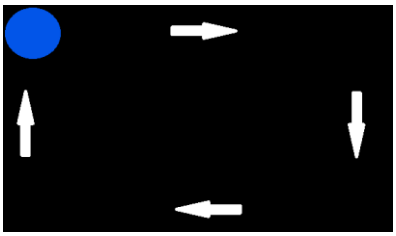


Figura 7. Experimento de Bola Azul.

2.5 Aplicación de los experimentos

Los dos experimentos se realizaron bajo las mismas condiciones de captura empleadas para construir el dataset, a fin de garantizar una comparabilidad estricta entre entrenamiento y evaluación. La muestra estuvo compuesta por 10 participantes (hombres y mujeres seleccionados al azar), y todas las sesiones se realizaron en un ambiente con iluminación favorable y a una distancia fija de 60 cm desde los ojos del participante hasta la pantalla (Figura 8). El sistema operó con la cámara web de consumo y el mismo stack de preprocesamiento ya descrito (detección facial, extracción de ROI oculares, escala de grises y normalización), manteniendo también las frecuencias de muestreo usadas en la recolección (60 fps como configuración objetivo; 30 fps como mínimo aceptable para equipos modestos). Estas condiciones replican las de la etapa de datos, donde se estimularon posiciones en pantalla mediante una retícula y tiempos controlados por punto, asegurando un flujo uniforme de pares (ojos, coordenadas) por participante.

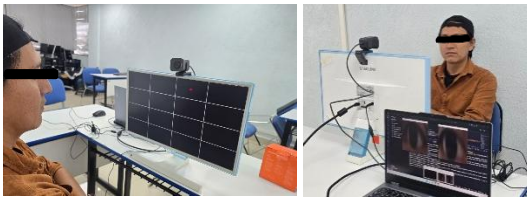


Figura 8. Participante 12 durante la aplicación de un experimento.

Ambos experimentos usaron el idéntico pipeline de ROI ocular (256×256, escala de grises, normalización), etiquetado sincronizado por frame con la coordenada del estímulo y los mismos criterios de calidad que en la creación del dataset. Con ello, los resultados reflejan exclusivamente el efecto del tipo de entrada (un ojo vs. ambos ojos) sobre la precisión espacial y la robustez en movimiento, sin introducir sesgos por diferencias en la captura o en el entorno.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

De acuerdo con la estructura definida en el documento base, los resultados se obtuvieron en 10 participantes bajo las mismas condiciones de captura usadas para el dataset (iluminación favorable y a 60 cm de distancia). En términos generales, el modelo binocular (DET) supera al monocular (SET) de manera consistente. Se observa mayor acierto en la clasificación (Accuracy, Precision, Recall, F1) y menor error en la regresión (MAE, MED, RMSE). En la práctica: estimaciones más precisas del punto de mirada y trayectorias más estables, con especial robustez frente a iluminación asimétrica y oclusiones parciales.

Experimento 1 – Calibración a 9 puntos.

Los indicadores muestran que DET logra una distribución de errores más uniforme en toda la rejilla, con reducciones claras de MAE, MED y RMSE respecto a SET; ver Tabla 2. El incremento en Accuracy/Precision/Recall/F1 indica que el sistema ubica mejor las miradas dentro de las regiones esperadas (AOIs) y comete menos falsos positivos/negativos. La mejora es especialmente visible en esquinas y bordes, zonas donde el enfoque monocular tiende a degradarse debido a cambios de pose o de iluminación. En síntesis, con estímulos fijos, DET ofrece mayor exactitud puntual y menor dispersión.

Tabla 2. Resultados del Experimento 1 con ambos modelos.

Calibración a 9 puntos		
Métricas	SET	DET
Accuracy	76%	82%
Presicion	78%	85%
Recall	74%	80%
F1-Score	76%	82%
MAE	121px	91px
MED	161px	120px
RMSE	194px	145px

La calibración con nueve puntos demuestra que el modelo binocular (DET) supera al modelo monocular (SET) en todas las métricas evaluadas (Figura 9). El modelo DET alcanza un 82 % de accuracy, 85 % de precision, 80 % de recall y 82 % de F1-score, frente a los valores de 76 %, 78 %, 74 % y 76 % obtenidos por SET.

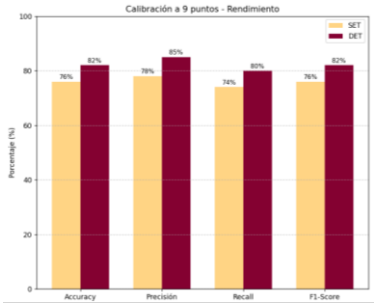


Figura 9. Desempeño gráfico de las métricas de clasificación (Calib. a 9 pts.).

En la calibración de 9 puntos, el modelo binocular (DET) (Figura 10) reduce claramente los errores frente al monocular (SET).

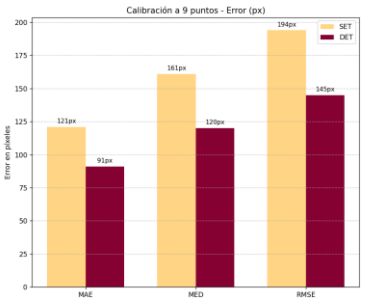


Figura 10. Desempeño gráfico de las métricas de regresión (Calib. a 9 pts.).

Experimento 2 – Bola Azul.

En este experimento, secuencia continua, DET presenta trayectorias más suaves y con menos deriva, reflejadas en RMSE más bajo a lo largo del recorrido y mayor proporción de muestras dentro del umbral de tolerancia alrededor del estímulo móvil. Las mejoras en Accuracy/Precision/Recall/F1 (ver Tabla 3) confirman un mejor "bloqueo" del objetivo durante el movimiento, con menos picos de error y recuperación más rápida ante microoclusiones o variaciones de luz. Con estímulos en movimiento, la ventaja binocular se acentúa, lo que evidencia una mayor estabilidad temporal y fiabilidad operativa para uso continuo.

Tabla 3 Resultados del experimento 2 aplicado a ambos modelos

Bola Azul		
Métricas	SET	DET
Accuracy	72%	85%
Presicion	75%	88%
Recall	70%	85%
F1-Score	72%	87%
MAE	135px	72px
MED	176px	94px
RMSE	258px	138px

En ambas pruebas, la superioridad de DET frente a SET es consistente: aumenta la tasa de aciertos y reduce el error en píxeles tanto en escenarios estáticos como en dinámicos, lo que refuerza la hipótesis de que combinar ambos ojos aporta señales complementarias que se traducen en mayor precisión y robustez del sistema (Figura 11).

En el experimento dinámico BlueBall, el modelo binocular (DET) reduce significativamente los errores frente al monocular (SET).

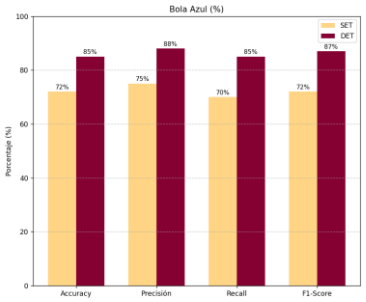


Fig. 11. Desempeño gráfico de las métricas de clasificación (Bola azul).

MAE: de 135 px a 72 px; MED: de 176 px a 94 px; y RMSE: de 258 px a 138 px; recortes de ~46–47%. Esto se traduce en trayectorias más suaves, un mejor bloqueo del objetivo y una menor deriva durante el movimiento continuo (Figura 12).

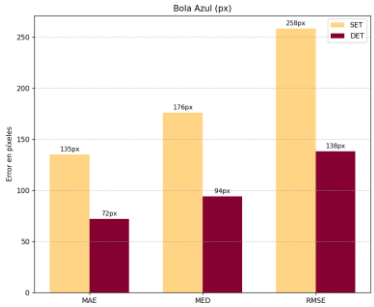


Fig. 12. Desempeño gráfico de las métricas de regresión (Bola Azul).

4. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que es posible reducir costos y democratizar la estimación de la mirada mediante una red neuronal convolucional (CNN) ligera y una cámara web, sin requerir un sensor infrarrojo (IR/PCCR) ni licencias propietarias. Se diseñó una metodología completa y

reproducible que incluye: un algoritmo de recolección sincronizado con los estímulos visuales, un dataset estratificado por participante con extracción precisa de regiones oculares (ROI) de 256×256 píxeles en escala de grises, aumentos de datos controlados y entrenamiento en TensorFlow/Keras bajo los mismos hiperparámetros para dos condiciones topológicamente equivalentes: SET (monocular) y DET (binocular). Más allá de la mejora cuantitativa, la relevancia práctica de este trabajo radica en su capacidad de operar con hardware cotidiano —una simple cámara web— sin depender de óptica IR ni de software propietario. Esto democratiza el acceso al seguimiento ocular, permitiendo su uso en educación, accesibilidad, interacción remota y en entornos de bajo presupuesto. La propuesta combina rigor experimental y bajo costo, ofreciendo una alternativa viable para investigación y aplicaciones comerciales ligeras que antes requerían equipos especializados.

Los resultados son concluyentes: el enfoque binocular (DET) supera de forma consistente al monocular (SET) en todas las métricas y en ambos protocolos. En la rejilla estática, el modelo binocular ofrece mayor exactitud espacial y menor dispersión, especialmente en los bordes y esquinas; en la rejilla dinámica, mantiene un seguimiento más estable, con menor deriva y error acumulado. Esta ventaja técnica proviene de que ambos ojos aportan señales complementarias y redundantes ante condiciones adversas (iluminación asimétrica, microoclusiones o reflejos): cuando un ojo pierde calidad, el otro la compensa y la red aprovecha relaciones geométricas (por ejemplo, la vergencia) que no están disponibles en el caso monocular.

Esto posiciona la propuesta como una alternativa accesible y robusta para aplicaciones de interacción humano–computadora, de accesibilidad y de entornos educativos o industriales en tiempo real. Como trabajo futuro, se plantea ampliar la diversidad de participantes y contextos, explorar estrategias de calibración mínima y desplegar el modelo en plataformas embebidas, manteniendo el principio rector de esta investigación: máxima precisión y estabilidad con el menor costo y complejidad de uso posibles.

REFERENCIAS

Ansari, et al,. (2021). Gaze tracking using an unmodified web camera and convolutional neural network. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, *11*(19), 9068. https://doi.org/10.3390/app11199068

Boesch, G. (2023). *Deep Residual networks (ResNet, ResNet-50) A complete guide*. Viso.Ai. https://viso.ai/deep-learning/resnet-residual-neural-network/

Bonnin, R. (2023). *Machine learning for developers*. Packt Publishing. https://www.oreilly.com/library/view/machine-learning-for/9781786469878/9f44e711-deb6-42de-abbd-524832ad32cc.xhtml

Daniel. (2021). *Convolutional Neural Network : definición y funcionamiento*. DataScientest. https://datascientest.com/es/convolutional-neural-network-es

Dilmegani, C. (2025). *12+ data augmentation techniques for data-efficient ML*. AIMultiple. https://research.aimultiple.com/data-augmentation-techniques/

Euclidean distance. (2023). Engati, de https://www.engati.com/glossary/euclidean-distance

Evdokimov., (2024). How scientists use webcams to track human gaze. *Frontiers for young minds*, *12*. https://doi.org/10.3389/frym.2024.1259404

Eye-tracking en la Investigación UX. 2025, https://aguayo.co/es/blog-aguayo-experiencia-usuario/eye-tracking-investigacion-ux/

Falch, L., (2024). Webcam-based gaze estimation for computer screen interaction. *Frontiers in Robotics and AI*, *11*, 1369566. https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1369566

Jain, A. (2024). *A comprehensive guide to performance metrics in machine learning*. Medium. https://medium.com/@abhishekjainindore24/a-comprehensive-guide-to-performance-metrics-in-machine-learning-4ae5bd8208ce

Kristensen, S. (2022). *Eye tracking*. iMotions. https://imotions.com/eye-tracking/

López, I. (2023). *Nueva tecnología EYE TRACKING*. Instituto Oftalmológico Recoletas. https://iorecoletas.com/eye-tracking/

Lubinus Badillo, et., (2021). Redes neuronales convolucionales: un modelo de Deep Learning en imágenes diagnósticas. Revisión de tema. *Revista colombiana de radiología*, *32*(3), 5591–5599. https://doi.org/10.53903/01212095.161

Murel, J., & Kavlakoglu, E. (2025). ¿Qué es el aumento de datos? *Ibm.com*. https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/data-augmentation

Novák, J. et., (2024). Eye tracking, usability, and user experience: A systematic review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, *40*(17), 4484–4500. https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2221600

Sauro, J. (2022). *Essential eye-tracking visualizations and metrics*. Measuringu.com. https://measuringu.com/eye-tracking/

Root Mean Square Error (RMSE). (2020). C3 AI. https://c3.ai/glossary/data-science/root-mean-square-error-rmse/

Vermeeren, et., (2010). User experience evaluation methods: Current state and development needs. *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries*.

Vidhya, et., (2025). Real-time gaze estimation using webcam-based CNN models for human–computer interactions. Computers, 14(2), 57. https://doi.org/10.3390/computers14020057m

Challenges in the Construction of a Dataset for Urban Wind Speed Forecasting

Flores Gómez, William*, Claudio Pachecano, Luisana*, Estrada Esquivel, Hugo*, Martínez Rebollar, Alicia*

* *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: {m24ce035, hugo.ee, luisana.cp, alicia.mr}@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: Constructing a robust dataset is a foundational aspect of developing reliable artificial intelligence forecasting frameworks. While extensive research focuses on refining predictive algorithms, the underlying process of creating high-quality datasets often receives less emphasis, despite its critical importance. Raw meteorological time series from complex urban environments are particularly difficult to work with. This paper presents a systematic methodology for building a reliable dataset from a single urban meteorological station in Mexico City, a location characterized by heterogeneous terrain, high population density, and complex wind dynamics. The methodology begins with a comparative analysis of twenty potential stations, culminating in a selection based on data completeness—a vital but seldom detailed procedure. The core of this work is a data reconstruction technique where missing values are addressed through linear interpolation enhanced with controlled Gaussian noise to maintain temporal continuity and preserve statistical variability. The final output is a clean and continuous dataset, validated and prepared for advanced predictive modeling under the conditions of Mexico City. This study asserts that rigorous dataset construction is not merely a preparatory step but a crucial research contribution, enabling more accurate and context-specific wind forecasting in metropolitan areas.

Keywords: Dataset Construction, Time Series, Data Preprocessing, Urban Wind Energy, Data Quality.

1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México experimenta un crecimiento demográfico acelerado que conlleva una creciente demanda de energía eléctrica. Para garantizar un desarrollo sostenible, resulta imprescindible diversificar las fuentes de generación mediante alternativas limpias y renovables. En este contexto, el recurso eólico urbano se perfila como una opción prometedora; sin embargo, su verdadero potencial y viabilidad aún no han sido plenamente evaluados.

México, a través de la Ley de Transición Energética (Diario Oficial de la Federación 2015), ha establecido compromisos concretos para incrementar la participación de las energías limpias en la matriz eléctrica nacional y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Cumplir con estos objetivos implica explorar fuentes no convencionales de generación, especialmente en áreas urbanas con alta demanda energética. Bajo esta perspectiva, evaluar el potencial eólico dentro de la Ciudad de México representa no sólo un interés científico, sino también una contribución a las metas nacionales de sostenibilidad y mitigación del cambio climático.

Comprender y aprovechar eficazmente la energía del viento requiere algo más que reconocer su existencia: es fundamental poder anticipar su comportamiento. Un pronóstico preciso de la velocidad del viento constituye una herramienta clave para evaluar la factibilidad de instalar turbinas, optimizar la generación y contribuir a la estabilidad del sistema eléctrico. Sin una predicción confiable, la naturaleza intermitente del viento lo convierte en un recurso difícil de gestionar.

Este desafío se agudiza en los entornos urbanos, donde la evaluación del recurso eólico es particularmente compleja debido a la alta variabilidad del flujo de aire provocada por la morfología urbana y la heterogeneidad del terreno (Simões y Estanqueiro, 2016). Además, las series temporales meteorológicas obtenidas de estaciones dentro de la ciudad presentan problemas significativos de calidad: valores atípicos, lagunas de información y errores de medición. A pesar de su importancia, este tema ha recibido poca atención en la literatura (Wang et al., 2015).

El presente trabajo aborda directamente estos desafíos, proponiendo una metodología detallada y replicable para la construcción de un conjunto de datos de alta calidad a partir de registros crudos obtenidos en una estación meteorológica urbana de la Ciudad de México. Se documentan los pasos de selección de estación, análisis exploratorio y reconstrucción de datos, destacando que este proceso no debe considerarse únicamente como una etapa preliminar, sino como un resultado de investigación esencial en la generación de información confiable para el estudio y pronóstico del recurso eólico urbano (Potter et al., 2008).

2. ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La literatura sobre el pronóstico de la velocidad del viento es extensa y abarca desde modelos físicos hasta enfoques avanzados de inteligencia artificial. Sin embargo, una revisión detallada revela que el rendimiento de cualquier modelo predictivo depende de un factor a menudo subestimado: la calidad y la preparación del conjunto de datos de entrada. Esta sección revisa los trabajos de investigación que justifican la importancia de un buen dataset como pilar de la investigación y explora los desafíos y enfoques de preprocesamiento documentados en el campo.

2.1 Importancia del dataset en la investigación

En los estudios de integración de energía, la importancia de los datos que alimentan los modelos, a menudo denominados el "combustible", con frecuencia se pasa por alto (Potter et al., 2008). La creación de un conjunto de datos robusto es un esfuerzo significativo que representa la base para cualquier análisis de sistemas de energía renovable. La falta de datos de alta calidad y representativos es uno de los principales obstáculos para llevar a cabo estudios de pronóstico precisos (Potter et al., 2008).
Esta problemática no es exclusiva del sector energético. En todas las áreas de la inteligencia artificial, se reconoce que la construcción de datasets es una tarea "laboriosa y monótona", pero absolutamente necesaria para el desarrollo de algoritmos precisos (Collins et al., 2008). La dependencia de buenos conjuntos de datos es alta, especialmente al modelar fenómenos con gran variabilidad. Por lo tanto, el proceso de construcción del dataset no debe ser visto como un simple paso preliminar, sino como una contribución de investigación fundamental por derecho propio).

2.2 Desafíos Específicos de los Datos de Viento Urbano

El pronóstico de viento en entornos urbanos presenta un conjunto único de desafíos. La caracterización del recurso eólico en las ciudades es difícil debido al alto impacto de los obstáculos en el flujo atmosférico (Simões y Estanqueiro, 2016). Los edificios y otras estructuras provocan fenómenos complejos como la separación del flujo, la reducción de la velocidad y un aumento en la turbulencia. Estos factores hacen que los datos de viento medidos en un entorno urbano sean no lineales y volátiles.

Además de la complejidad del fenómeno físico, los datos crudos de las series temporales de viento a menudo sufren de problemas de calidad. Las mediciones pueden contener valores atípicos (outliers) generados por fallos de los anemómetros, errores de operación o factores aleatorios (Wang et al., 2015). A pesar de su importancia, pocos estudios se han enfocado en la detección y el preprocesamiento de estos datos anómalos. La utilización de un dataset con estas imperfecciones, sin un tratamiento adecuado, puede llevar a una estimación incorrecta de la tendencia de fluctuación y, en consecuencia, a errores significativos en el pronóstico (Wang et al., 2015).

2.3 Enfoques de Preprocesamiento

Para abordar los desafíos presentados por los datos de viento, la literatura propone diversas estrategias de preprocesamiento. Un enfoque común es la selección de características (feature selection), cuyo objetivo es identificar las variables de entrada más relevantes para el modelo de pronóstico. Este proceso permite reducir la carga computacional y evita que factores irrelevantes o redundantes afecten negativamente el rendimiento del modelo (Liu et al., 2020).
Otro enfoque complementario es la extracción de características, donde no se eliminan variables, sino que se crean nuevas a partir de los datos crudos. Por ejemplo, en lugar de utilizar directamente una larga serie de mediciones de viento, se pueden calcular sus propiedades estadísticas, como la media o la desviación estándar, y utilizar estas como entradas para el modelo. Esta técnica puede simplificar la estructura de una red neuronal y acelerar su proceso de aprendizaje (Monfared et al., 2009).

Finalmente, existen métodos más avanzados que se centran en la naturaleza de la señal. Técnicas como la descomposición de la señal buscan separar la serie original en componentes más simples y predecibles, tales como la tendencia principal y las fluctuaciones de alta frecuencia (Liu et al., 2019). Aunque potentes, estos requieren un conocimiento más profundo del procesamiento de señales. En conjunto, estas estrategias demuestran que el tratamiento cuidadoso de los datos es un paso metodológico crucial.

3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL DATASET

Tal como se observa en la Figura 1, La presente investigación siguió una metodología cuantitativa y sistemática, enfocada en transformar datos meteorológicos crudos en un dataset de alta calidad, apto para aplicaciones de inteligencia artificial. El desarrollo de este proceso se considera la contribución principal de este trabajo. La metodología se dividió en las siguientes fases:

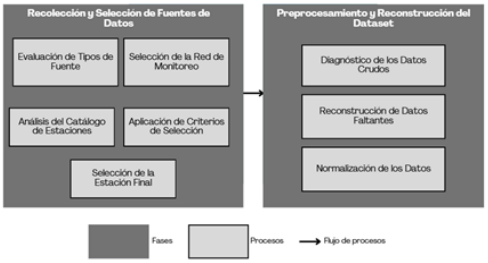


Figura 1 Diagrama de la Metodología de Construcción del Dataset.

3.1 Recolección y Selección de Fuentes de Datos

Esta fase se centró en la identificación y evaluación exhaustiva de las fuentes de datos disponibles para asegurar la máxima representatividad y calidad posible para el estudio. El objetivo era garantizar que los datos de entrada fueran un reflejo fiel de las condiciones locales.

Evaluación de Tipos de Fuente.
Se consideraron dos categorías principales de datos: los de reanálisis y los medidos directamente en estaciones. Se exploró el uso de datos de reanálisis, como los proporcionados por la NASA, que son generados por modelos de asimilación climática. Aunque estos datos son valiosos para estudios a gran escala, se determinó que, para un análisis enfocado en la evaluación del recurso eólico en un punto urbano específico, los datos medidos en sitio son superiores. Los datos de estaciones reflejan con mayor fidelidad las condiciones microclimáticas y las perturbaciones locales (turbulencia, efectos de edificios) que caracterizan a un entorno urbano complejo (Simões y Estanqueiro, 2016).

Selección de la Red de Monitoreo.
Con base en la decisión anterior, se seleccionó como fuente principal la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Gobierno de la Ciudad de México. Se accedió a los registros históricos públicos a través de su portal oficial: https://www.aire.cdmx.gob.mx/.

Análisis del Catálogo de Estaciones.
Se analizó el catálogo completo de la red, compuesto por 72 estaciones, con el objetivo de identificar su estado operacional y la disponibilidad de datos. Un primer hallazgo relevante fue que una parte significativa de la red (24 estaciones) se encontraba fuera de operación, lo que evidencia el desafío práctico de obtener series temporales continuas y de largo plazo para un análisis robusto. Posteriormente, se graficaron las estaciones restantes para evaluar la cantidad de valores faltantes en sus registros, como se muestra en la Figura 2, las barras representan el número total de registros ausentes (NA) para cada estación activa, ordenadas de la más completa (izquierda) a la menos completa (derecha).

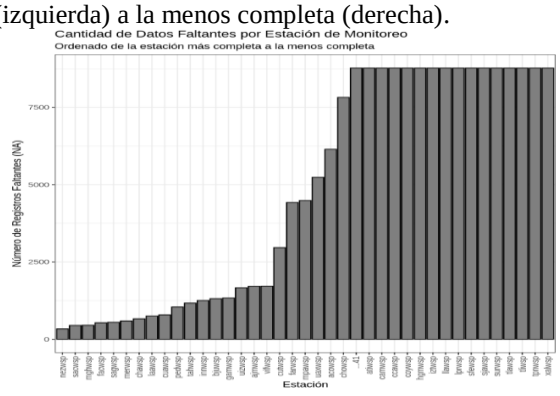


Figura 2 Comparación de datos faltantes por estación.

A partir de este análisis, se seleccionó la estación NEZWPS (Nezahualcóyotl) por presentar la menor proporción de datos faltantes, lo que la convierte en la más completa y adecuada para el desarrollo del estudio.

Aplicación de Criterios de Selección.
Para las estaciones activas, se estableció un criterio cuantitativo de integridad de datos para el descarte. Se eliminaron sistemáticamente todas aquellas estaciones que presentaran más de un 20% de datos faltantes en su registro histórico para la variable de velocidad del viento. Este filtro es un paso crítico, ya que la literatura advierte que el uso de datos con valores atípicos o faltantes puede llevar a estimaciones imprecisas y conclusiones erróneas (Wang et al., 2015). Durante el análisis, se encontraron casos extremos, como estaciones con más del 50% de sus datos ausentes, que fueron inmediatamente descartadas.

Selección de la Estación Final.
Tras aplicar este riguroso proceso de filtrado, se seleccionó una única estación que, si bien no estaba exenta de problemas de datos, ofrecía el registro más completo y consistente del grupo. Esta estación se definió como el caso de estudio para el resto de la investigación.

3.2 Preprocesamiento y Reconstrucción del Dataset

Una vez seleccionada la estación, los datos crudos de velocidad del viento (m/s) y temperatura (°C) se sometieron a un proceso intensivo de limpieza, reconstrucción y transformación para generar un dataset continuo y normalizado.

Diagnóstico de los Datos Crudos.
Se realizó un análisis exploratorio inicial para cuantificar la magnitud de los problemas en los datos crudos. Utilizando herramientas estadísticas, el análisis se centró en identificar y contar la frecuencia de los registros con valor de NA. Estos valores, utilizados por el sistema de monitoreo para indicar mediciones incorrectas o fallos del sensor, representan los datos faltantes que deben ser tratados. Este diagnóstico fue esencial para dimensionar la magnitud de la tarea de reconstrucción del dataset. La Tabla 1 resume este análisis, donde se observa que la variable 'Velocidad del Viento' tiene un 7.60% de registros ausentes.

Tabla 1 Análisis Cuantitativo de Datos Faltantes en el Dataset Crudo.

Variable	Registros Totales	Registros Faltantes (NA)	Porcentaje Faltante
Velocidad del Viento	8776	670	7.60%

Reconstrucción de Datos Faltantes.
Se evitó la simple eliminación de registros con datos faltantes, ya que esto habría destruido la continuidad temporal de la serie. En su lugar, se aplicó una técnica de interpolación lineal con ruido gaussiano para estimar los valores en los huecos. Este enfoque se eligió para no solo garantizar un dataset continuo, sino también para preservar la variabilidad estadística y la naturaleza estocástica del viento al rellenar las lagunas de información con valores que siguen una tendencia lineal entre los puntos de datos existentes, a la vez que incorporan una perturbación aleatoria controlada.

Normalización de los Datos.
Como paso final del preprocesamiento, el dataset ya reconstruido y completo fue normalizado. Todas las variables (velocidad y temperatura) se escalaron a un rango uniforme de 0 a 1 utilizando un escalador Min-Max. Este procedimiento es

un requisito estándar para el uso de datos en muchos algoritmos de inteligencia artificial, ya que mejora la estabilidad y acelera la convergencia durante el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado principal de la metodología aplicada es la construcción de un dataset continuo y limpio, derivado de datos meteorológicos crudos que inicialmente eran inadecuados para el modelado. Esta sección presenta los hallazgos cuantitativos y cualitativos de cada fase del proceso.

4.1 Resultados de la Selección de Estaciones

El análisis inicial del catálogo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico reveló desafíos significativos para la obtención de datos completos. De las 72 estaciones listadas, 24 se encontraban fuera de operación. Para las estaciones activas restantes, se realizó un análisis de completitud de datos, estableciendo un umbral de descarte del 20% de datos faltantes en la serie histórica.

Este filtro cuantitativo fue determinante. Se encontró que varias estaciones superaban ampliamente este umbral, con casos extremos como el de la estación de Milpa Alta, que presentaba un 51.42% de datos de viento faltantes. En contraste, la estación seleccionada para este estudio, aunque no exenta de problemas, mostró el registro más completo, justificando así su elección como el caso de estudio más viable.

4.2 Caracterización de los Datos Crudos

El análisis exploratorio de la serie temporal cruda de la estación seleccionada confirmó la necesidad de un preprocesamiento riguroso. Los datos originales presentaban lagunas de información significativas, compuestas por valores nulos (NA).

La visualización de la serie temporal original completa, como se muestra en la Figura 3, revela gráficamente estas discontinuidades a lo largo de todo el periodo de estudio. Los "huecos" en la gráfica representan los períodos donde los datos faltaban, haciendo imposible su uso directo en algoritmos de aprendizaje.

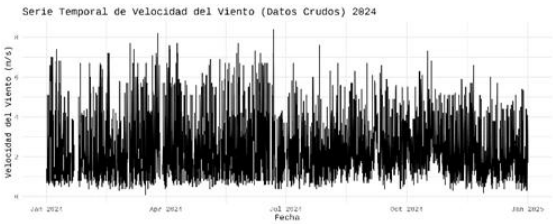


Figura 3 Serie Temporal de la Velocidad del Viento (Datos Crudos).

Para apreciar en detalle la naturaleza de estas interrupciones, la Figura 4 presenta un zoom a una sección específica del dataset. En esta vista ampliada, es posible observar claramente los puntos de datos existentes y los vacíos donde la continuidad de la serie se pierde, un problema que no es fácilmente visible en la gráfica del año completo.

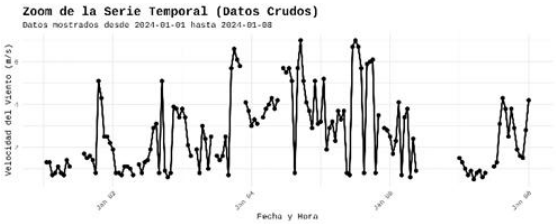


Figura 4 Análisis Detallado de Discontinuidades en la Serie Temporal Cruda.

4.3 Resultados de la Reconstrucción del Dataset

La aplicación de la metodología de preprocesamiento transformó exitosamente el dataset discontinuo en uno completo y continuo.
La técnica de interpolación lineal con ruido gaussiano rellenó las lagunas de datos, resolviendo el problema identificado en la fase de caracterización.

La efectividad de esta reconstrucción a nivel local se demuestra en la Figura 5. Esta gráfica muestra la misma sección ampliada de la figura anterior, pero después de haber aplicado la interpolación. La línea ahora es continua y conecta los puntos de datos que antes estaban aislados, demostrando visualmente el éxito del método.

Figura 5: Interpolación Lineal con Ruido Gaussiano.

Finalmente, la Figura 6 muestra la serie temporal completa de velocidad del viento después de aplicar este proceso a todo el dataset. En contraste con la Figura 2, la serie ahora es continua en su totalidad y no presenta interrupciones. Esta visualización de "antes y después" a gran escala sirve como la principal evidencia cualitativa del éxito de la metodología implementada.

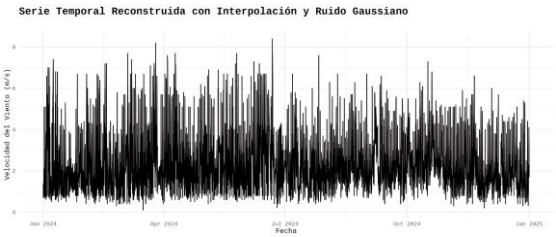


Figura 6: Serie Temporal de la Velocidad del Viento (Dataset Reconstruido).

La discusión de estos resultados subraya una conclusión importante: la construcción de un dataset no es una simple tarea de limpieza, sino un proceso de reconstrucción que

requiere un enfoque metodológico riguroso. Sin estos pasos, cualquier resultado de un modelo predictivo posterior carecería de una base fiable. El dataset resultante de este trabajo constituye, por lo tanto, la base validada necesaria para futuros estudios de pronóstico.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación se centró en los desafíos de la construcción de un dataset para el pronóstico de viento en entornos urbanos. El objetivo fue desarrollar y documentar una metodología rigurosa para la preparación de datos, un paso que se argumenta es un resultado de investigación crítico por sí mismo. El trabajo ha demostrado con éxito que es posible transformar una serie temporal cruda, incompleta e inconsistente en un conjunto de datos robusto y listo para el modelado.

La metodología comenzó con un proceso de selección basado en la integridad de los datos de múltiples estaciones, justificando la elección de un único caso de estudio. El análisis exploratorio subsecuente cuantificó los problemas presentes en los datos crudos, tales como un alto porcentaje de valores faltantes y registros anómalos. La aplicación de una técnica de reconstrucción, basada en interpolación lineal con ruido, fue exitosa y resultó en una serie temporal continua que preserva la variabilidad estadística natural.

El hallazgo principal de este artículo no es un nuevo modelo de pronóstico, sino el propio marco metodológico detallado. Se ha presentado un procedimiento replicable que otros investigadores pueden seguir al enfrentarse a problemas similares con datos meteorológicos. La implicación más importante de este estudio es que subraya la necesidad de priorizar el tratamiento de los datos, ya que sin una base de datos de alta calidad como la que se ha construido aquí, la precisión y la fiabilidad de cualquier modelo de inteligencia artificial posterior estarían comprometidas. Este trabajo valida la idea de que un preprocesamiento riguroso no es una tarea preliminar, sino una condición indispensable para la investigación en este campo.

Sobre la base de la disponibilidad y calidad de los datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) analizados, se concluye que la evaluación del potencial del recurso eólico en la Ciudad de México está severamente obstaculizada por la falta de integridad y continuidad de los registros históricos. La alta proporción de datos faltantes y la discontinuidad operativa de una parte de las estaciones impiden un análisis estadístico robusto y a largo plazo. Por lo tanto, cualquier estudio serio sobre el recurso eólico urbano en la CDMX debe comenzar necesariamente con una fase rigurosa de reconstrucción y validación del dataset, como la propuesta en este trabajo.

Finalmente, este trabajo concluye dejando el camino preparado para futuras investigaciones. El dataset limpio y validado que se ha generado es ahora el insumo ideal para la siguiente fase: el desarrollo y la evaluación de modelos de pronóstico avanzados, como las redes neuronales recurrentes (LSTM). Esta futura línea de trabajo, que ahora puede llevarse a cabo sobre una base de datos fiable, permitirá explorar con mayor confianza el potencial del recurso eólico urbano.

REFERENCIAS

Collins, B., Deng, J., Li, K., and Fei-Fei, L. (2008). Towards Scalable Dataset Construction: An Active Learning Approach. In: Forsyth, D., Torr, P., and Zisserman, A. (eds.) ECCV 2008, Part I, LNCS 5302, pp. 86-98. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Diario Oficial de la Federación. (2015) Ley de Transición Energética.

Potter, C.W., Lew, D., McCaa, J., Cheng, S., Eichelberger, S., and Grimit, E. (2008). Creating the Dataset for the Western Wind and Solar Integration Study (U.S.A.). Wind Engineering, 32(4), pp. 325-338.

Simões, T. and Estanqueiro, A. (2016). A new methodology for urban wind resource assessment. Renewable Energy, 89, pp. 598-605.

Soman, S.S., Zareipour, H., Malik, O., and Mandal, P. (2010). A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons. 2010 North American Power Symposium, pp. 1-8.

Wang, J., Qin, S., Zhou, Q., and Jiang, H. (2015). Medium-term wind speeds forecasting utilizing hybrid models for three different sites in Xinjiang, China. Renewable Energy, 76, pp. 91-101.

Comparative Analysis between Traditional Approaches and Neural Networks in Human Action Recognition

Arce Serrano Mariana *, Pinto Elías Raúl *, Villanueva Tavira Jonathan *, Magadán Salazar Andrea *, Fuentes Pacheco Jorge Alberto *.

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México, 62490.
(e-mail: m24ce047@cenidet.tecnm.mx; raul.pe@cenidet.tecnm.mx; jonathan.vt@cenidet.tecnm.mx; andrea.ms@cenidet.tecnm.mx; jorge.fp@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Automatic human action recognition has undergone a significant evolution from methods based on manually extracted features to contemporary deep learning architectures. This work presents a comparative analysis between traditional classification approaches and deep neural networks applied to human action recognition. Traditional methods such as SVM with HOG and NBNN with eigenjoints were evaluated against deep learning architectures including Two-Stream CNN, YOLO-LSTM, and Semi-Coupled CNN for low-resolution scenarios, using the standard Weizmann, KTH, and UCF101 datasets. The results indicate that deep neural networks achieve superior performance on complex datasets, while traditional approaches maintain advantages in scenarios with limited computational resources. All methods experience significant degradation under extremely low resolution. Hybrid methods combining CNN feature extraction with traditional classifiers emerge as balanced alternatives for resource-constrained applications.

Keywords: Human action recognition, computer vision, convolutional neural networks, support vector machines, deep learning

1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento automático de acciones humanas representa uno de los retos más significativos en el campo de la visión por computadora moderna. Esta área de investigación ha captado la atención de investigadores debido a su amplio espectro de aplicaciones prácticas, desde sistemas de vigilancia inteligente hasta interfaces avanzadas de interacción humano-computadora, análisis deportivo automatizado y sistemas de asistencia robótica Ullah et al. (2023).

La complejidad inherente de interpretar automáticamente el comportamiento humano a partir de secuencias visuales radica en la necesidad de integrar múltiples disciplinas: procesamiento digital de imágenes, técnicas de aprendizaje automático y comprensión semántica del movimiento corporal humano. Esta convergencia multidisciplinaria ha dado lugar a dos paradigmas principales que han dominado el campo durante las últimas dos décadas.

Los primeros esfuerzos en reconocimiento de acciones se centraron en el diseño manual de características visuales específicamente optimizadas para capturar patrones distintivos de movimiento. Investigadores desarrollaron descriptores especializados como los Histogramas de Gradientes Orientados (HOG), Puntos de Interés Espacio-Temporales (STIP), y Características Invariantes a Escala (SIFT), que posteriormente se combinaron con algoritmos de clasificación supervisada tradicionales Chen et al. (2017); Laptev (2005). Estos enfoques, que incluyen k-Nearest Neighbors (KNN), Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), árboles de decisión y Random Forest (RF), mostraron resultados prometedores en entornos controlados como los datasets Weizmann Blank et al. (2005) y KTH Schuldt et al. (2004).

Sin embargo, la transición hacia aplicaciones en entornos reales expuso las limitaciones fundamentales de estos enfoques tradicionales. Como observan Torpey and Celik (2020), los descriptores diseñados de forma manual presentan un problema de limitaciones: aunque funcionan adecuadamente en entornos controlados, pierden capacidad predictiva cuando se trasladan a escenarios reales donde aparecen complicaciones como diferentes posiciones de cámara, obstrucciones visuales, cambios de iluminación y la variabilidad natural en cómo las personas ejecutan acciones cotidianas.

La llegada del aprendizaje profundo revolucionó completamente el panorama del reconocimiento de acciones humanas. Las arquitecturas basadas en redes neuronales convolucionales (CNN), redes de memoria larga a corto plazo (LSTM) y más recientemente, mecanismos de atención como los Transformers, han mostrado capacidades excepcionales para aprender representaciones jerárquicas directamente de los datos sin intervención manual Singh et al. (2021). Esta capacidad de aprendizaje automático de características ha permitido lograr precisiones en datasets como UCF101 Soomro et al. (2012), HMDB51 Kuehne et al. (2011) y Kinetics Kay et al. (2017).

Sin embargo, la adopción de redes neuronales profundas introduce desafíos prácticos significativos: estos modelos re-

quieren volúmenes considerables de datos etiquetados para lograr convergencia efectiva, demandan recursos computacionales intensivos durante el entrenamiento e inferencia y presentan dificultades de interpretabilidad que deben evaluarse según los requerimientos específicos de cada aplicación Ullah et al. (2023).

Un desafío particular que trasciende ambos enfoques es el reconocimiento de acciones en condiciones de baja resolución. Esta problemática es especialmente relevante en aplicaciones de vigilancia con restricciones de ancho de banda, dispositivos móviles con limitaciones de procesamiento y sistemas que requieren análisis en tiempo real. Los trabajos de Chen et al. (2017) y Xu et al. (2018) han documentado que el rendimiento de los modelos experimenta degradación significativa cuando la resolución desciende por debajo de 32x32 píxeles, motivando el desarrollo de técnicas especializadas y arquitecturas adaptadas.

Este trabajo presenta un análisis comparativo sistemático entre enfoques tradicionales y de aprendizaje profundo en reconocimiento de acciones humanas, evaluando no solo la precisión predictiva sino también consideraciones prácticas como complejidad computacional, eficiencia de recursos y aplicabilidad en escenarios reales.

2. METODOLOGÍA

Para realizar un análisis comparativo equilibrado, se seleccionaron métodos representativos de dos paradigmas fundamentalmente diferentes en reconocimiento de acciones humanas. Esta selección se basó en tres criterios principales: representatividad metodológica de cada paradigma, disponibilidad de resultados comparables en datasets estándar y diversidad en enfoques algorítmicos.

Los enfoques tradicionales incluyen dos métodos: SVM con descriptores HOG, que representa el enfoque de características diseñadas manualmente para datos RGB y ha sido ampliamente estudiado en la literatura debido a su efectividad en datasets controlados Abdulmunem et al. (2015); y NBNN con eigenjoints, que ilustra el procesamiento de datos de profundidad y esqueleto, un enfoque que ha ganado relevancia por su eficiencia computacional en aplicaciones con recursos limitados Ullah et al. (2023).

Para aprendizaje profundo se seleccionaron tres métodos que abordan diferentes aspectos del reconocimiento temporal: Two-Stream CNN Simonyan and Zisserman (2014) constituye una arquitectura fundacional que mostró la viabilidad de separar procesamiento espacial y temporal; Semi-Coupled CNN Chen et al. (2017) fue incluido específicamente por su especialización en condiciones de baja resolución; y YOLO-LSTM Lee et al. (2025) representa enfoques contemporáneos que integran detección de objetos con análisis temporal, mostrando cómo las arquitecturas híbridas pueden aprovechar información de localización espacial.

2.1 Enfoques Tradicionales de Clasificación

2.1.1 Máquinas de Soporte Vectorial con Descriptores HOG

Para evaluar enfoques tradicionales, adoptamos la metodología de Abdulmunem et al. (2015), quienes desarrollaron un sistema basado en SVM que utiliza características HOG para capturar patrones estructurales en secuencias de video. Su arquitectura mostrada en la Fig. 1 consta de cuatro módulos secuenciales: (1) detección de puntos de interés mediante SIFT, (2) extracción de descriptores HOG en los puntos identificados, (3) construcción de un vocabulario visual (bag-of-words), y (4) clasificación mediante SVM (Abdulmunem et al., 2015).

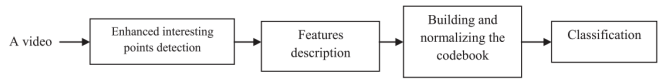


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema propuesto. Tomado de Abdulmunem et al. (2015)

Un aspecto distintivo de este método es el ajuste adaptativo del umbral SIFT, que permite regular automáticamente la densidad de puntos de interés según la complejidad visual de cada frame, evitando la extracción excesiva de características en regiones de fondo Abdulmunem et al. (2015). La Fig. 2 ilustra esta diferencia: sin ajuste de umbral se detectan puntos redundantes en áreas irrelevantes, mientras que el umbral optimizado concentra la detección en regiones significativas que contienen información de movimiento.

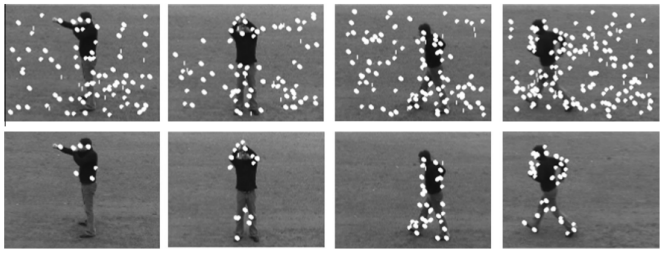


Figura 2. Comparación de detección SIFT con umbral estándar (superior) y umbral ajustado (inferior).

2.1.2 Naive Bayes Nearest Neighbor con Eigenjoints

El clasificador basado en Naive Bayes Nearest Neighbor (NBNN) combinado con eigenjoints constituye un enfoque tradicional efectivo para reconocimiento de acciones basado en datos de profundidad y esqueleto. Este método aprovecha la reducción de dimensionalidad mediante análisis de componentes principales sobre las coordenadas articulares (eigenjoints), seguido de clasificación no paramétrica mediante vecinos más cercanos con supuesto de independencia condicional Ullah et al. (2023).

El pipeline típico incluye: (1) selección de frames informativos mediante energía de movimiento acumulativa computada sobre mapas de profundidad, lo cual elimina frames redundantes o ruidosos; (2) extracción de eigenjoints que capturan las direcciones de máxima varianza en el espacio de configuraciones articulares; y (3) clasificación NBNN que estima la clase más probable comparando cada característica de prueba con los ejemplos de entrenamiento sin requerir una etapa explícita de agrupamiento Ullah et al. (2023). Esta aproximación ofrece ventajas computacionales al operar con representaciones de baja dimensionalidad

y evitar el entrenamiento de modelos paramétricos complejos, resultando particularmente apropiada para escenarios con recursos limitados.

2.2 Arquitecturas de Aprendizaje Profundo

2.2.1 Redes Convolucionales Two-Stream

La arquitectura Two-Stream de Simonyan and Zisserman (2014) aborda el reconocimiento de acciones mediante procesamiento dual de información espacial y temporal a través de redes convolucionales independientes.

El flujo espacial opera sobre fotogramas RGB individuales redimensionados a 224×224 píxeles, implementando reconocimiento de acciones desde imágenes estáticas mediante pre-entrenamiento en ImageNet ILSVRC-2012 Russakovsky et al. (2015). El flujo temporal procesa campos de desplazamiento de flujo óptico denso apilados. Simonyan and Zisserman (2014) emplean L=10 fotogramas consecutivos, generando volúmenes de entrada de 20 canales (componentes horizontal y vertical del flujo óptico para cada frame). Ambos flujos comparten arquitectura convolucional: cinco capas convolucionales con filtros 3×3, activaciones ReLU y max-pooling estratégicamente intercalado Simonyan and Zisserman (2014).

El entrenamiento utiliza SGD con momentum de 0.9, iniciando con tasa de aprendizaje de 10^{-2}, reducida a 10^{-3} tras 50K iteraciones y a 10^{-4} tras 70K iteraciones, finalizando en 80K iteraciones Simonyan and Zisserman (2014). La fusión de predicciones se implementa mediante promediado de scores o SVM multiclase entrenada sobre scores normalizados L2 de ambas redes Simonyan and Zisserman (2014).

2.2.2 Semi-Coupled CNN para Baja Resolución

La arquitectura Semi-Coupled Two-Stream propuesta por Chen et al. (2017) aborda el reconocimiento de acciones en resoluciones extremadamente bajas (eLR) mediante una estrategia de compartición de filtros entre redes que procesan videos de alta y baja resolución durante el entrenamiento. El enfoque implementa dos redes convolucionales fusionadas two-stream: una red eLR que procesa frames RGB interpolados de 16×12 a 32×32 píxeles junto con su flujo óptico correspondiente, y una red HR que opera con frames de 32×32 píxeles nativos Chen et al. (2017). La compartición de filtros se implementa mediante ratios de acoplamiento crecientes con la profundidad de la red $c_1 = 0$, $c_2 = 0{,}25$, $c_3 = 0{,}5$, $c_4 = 0{,}75$, $c_5 = 1$, donde $c_n = \frac{k^n}{D^n}$ representa la proporción de filtros compartidos en la capa n.

Durante el entrenamiento, los pesos compartidos se actualizan dos veces por iteración (una vez para cada red), mientras que los filtros no compartidos aprenden características específicas de cada dominio de resolución Chen et al. (2017). El sistema evalúa tres operadores de fusión (suma, concatenación y convolución) aplicados después de la tercera capa convolucional, logrando un 93,7 % de precisión en el dataset IXMAS Weinland et al. (2006) Fig. 3 y 29,2 % en HMDB-51 Kuehne et al. (2011) en condiciones de resolución extremadamente baja.

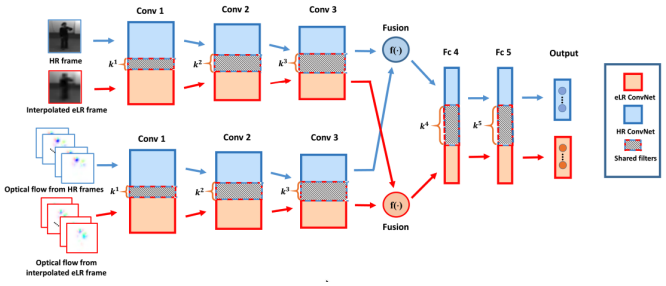


Figura 3. Arquitectura semi-acoplada con compartición de filtros k^n entre capas. Tomado de Chen et al. (2017).

2.2.3 Enfoque YOLO-LSTM Orientado a Objetos

El método YOLO-LSTM presentado por Lee et al. (2025) en Scientific Reports propone una solución que integra detección de objetos con análisis temporal a través de un sistema de procesamiento por etapas. En la primera fase, el modelo emplea YOLOv7 previamente entrenado con el conjunto de datos COCO para identificar y ubicar personas en cada cuadro del video. Este paso inicial permite extraer características espaciales relevantes a partir de las cajas delimitadoras (bounding boxes), capturando información fundamental sobre la posición, tamaño y relaciones espaciales de los objetos detectados Lee et al. (2025).

Para el análisis temporal, los autores implementaron una red LSTM con dos capas que contienen 96 y 128 unidades ocultas respectivamente. Cada capa incorpora regularización mediante dropout (0.2 y 0.3), regularización L2 y normalización por lotes, técnicas que en conjunto ayudan a estabilizar el proceso de entrenamiento y mejorar la generalización del modelo Lee et al. (2025). Una característica distintiva del sistema es su representación compacta de la información: utiliza un vector de 11 componentes derivados directamente de las cajas delimitadoras, que incluye medidas como ancho, alto, relación de aspecto, coordenadas de las esquinas y promedios dimensionales Lee et al. (2025).

Tras las capas LSTM, la arquitectura se completa con tres capas densas de 192, 128 y 64 neuronas, todas equipadas con activación ReLU y las mismas estrategias de regularización mencionadas anteriormente. El proceso culmina con una capa softmax que genera las predicciones finales de las acciones Lee et al. (2025).

2.3 Configuración Experimental

Los experimentos se realizaron utilizando las particiones estándar establecidas en la literatura para garantizar comparabilidad directa con trabajos previos. El dataset Weizmann emplea validación cruzada leave-one-out por sujeto, donde cada uno de los 9 sujetos se utiliza alternativamente como conjunto de prueba. El dataset KTH utiliza la división convencional de 16 sujetos para entrenamiento y 9 para evaluación. UCF101 emplea la partición Split 1 oficial con distribución 70 %-30 % entre entrenamiento y prueba. La Tabla 1 resume los resultados reportados en la literatura para los métodos evaluados en estos datasets.

El preprocesamiento incluye redimensionamiento adaptado por metodología (128x128 píxeles para métodos tradi-

cionales, 224x224 para CNN), normalización de intensidad al rango [0,1], y técnicas de aumentación conservadoras que preservan la coherencia semántica de las acciones, limitándose principalmente a volteo horizontal para evitar distorsiones temporales.

Tabla 1. Rendimiento Reportado en la Literatura para Métodos Representativos

Método	Weizmann	KTH	UCF101
SVM optimizado	96.66 %	97.89 %	-
YOLO-LSTM	100 %	94.2 %	89.1 %
Semi-Coupled CNN	-	-	19.69 %*

*En resolución extremadamente baja (16x12)
(-) = No reportado en ese dataset

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección presenta los resultados experimentales del análisis comparativo. Se evalúa el rendimiento predictivo de los métodos seleccionados en tres datasets estándar: Weizmann, KTH y UCF101. Estos conjuntos de datos presentan complejidad progresiva, desde condiciones controladas hasta videos capturados en entornos reales, permitiendo observar cómo se comporta cada paradigma bajo diferentes niveles de dificultad. Adicionalmente, se examina el rendimiento bajo condiciones de resolución limitada, analizando cómo se degrada la precisión cuando la calidad visual es restringida.

3.1 ***Rendimiento Comparativo en Conjuntos de Datos Estándar***

3.1.1 Evaluación en Dataset Weizmann

Los resultados obtenidos en el dataset Weizmann revelan rendimientos notablemente elevados para ambas categorías de enfoques, lo cual se atribuye principalmente a las condiciones controladas que caracterizan este conjunto de datos. Los métodos basados en SVM con características HOG alcanzan precisiones del 96.66 % Abdulmunem et al. (2015), mientras que Random Forest con características STIP obtiene valores cercanos al 87.8 %. Entre los clasificadores tradicionales evaluados, SVM muestra consistentemente el rendimiento superior, seguido por Random Forest y posteriormente k-NN.

Las arquitecturas de redes neuronales profundas logran precisiones excepcionales, con el enfoque YOLO-LSTM alcanzando el 100 % de precisión Lee et al. (2025) y arquitecturas híbridas CNN-LSTM llegando hasta 98.3 % Singh et al. (2021). El rendimiento sobresaliente de las redes profundas en este dataset sugiere que para conjuntos de datos de complejidad limitada como Weizmann, tanto métodos tradicionales como de aprendizaje profundo pueden lograr resultados satisfactorios, aunque las redes profundas mantienen una ligera ventaja.

3.1.2 Evaluación en Dataset KTH

El dataset KTH presenta un desafío considerablemente mayor debido a la variabilidad introducida en las condiciones de grabación, incluyendo diferentes escenarios ambientales y variaciones en la vestimenta de los sujetos. Los métodos tradicionales experimentan una degradación notable en su rendimiento: SVM alcanza 97.89 % Abdulmunem et al. (2015) manteniendo un rendimiento competitivo, mientras que enfoques de aprendizaje profundo como YOLO-LSTM obtienen 94.2 % Lee et al. (2025). Esta comparación revela que en condiciones de variabilidad moderada, ambos paradigmas mantienen rendimientos comparables.

Las arquitecturas de redes neuronales profundas mantienen un rendimiento consistente, mostrando la capacidad de estas redes para aprender representaciones adaptativas que resultan en robustez ante la variabilidad de condiciones. La diferencia en rendimiento entre paradigmas es menos pronunciada en KTH comparado con datasets más complejos, sugiriendo que el nivel de complejidad del dataset influye significativamente en la ventaja relativa del aprendizaje profundo.

3.1.3 Evaluación en Dataset UCF101

El dataset UCF101 representa el desafío más significativo entre los conjuntos de datos evaluados debido a su diversidad y complejidad inherente, derivada de videos recolectados de fuentes en línea con condiciones de grabación altamente variables. En este contexto, las diferencias entre paradigmas se vuelven más evidentes, con enfoques de aprendizaje profundo mostrando una superioridad clara.

El enfoque YOLO-LSTM alcanza 89.1 % en UCF101 Lee et al. (2025), mientras que arquitecturas especializadas como Attention-LSTM + CNN logran 88.42 % Singh et al. (2021). Por otro lado, los métodos diseñados específicamente para escenarios de resolución extremadamente baja, como Semi-Coupled CNN Chen et al. (2017), obtienen resultados considerablemente menores (19.69 %) en este dataset de resolución estándar. Esta diferencia sustancial es esperable, ya que Semi-Coupled CNN fue optimizado para operar en condiciones de resolución extremadamente limitadas (16×12 píxeles), contexto donde muestra su verdadero valor al mantener capacidades de reconocimiento en escenarios donde otros métodos convencionales fallarían completamente. La Tabla 2 presenta un análisis detallado del comportamiento de diferentes métodos bajo distintos niveles de degradación de resolución en UCF101. Esta comparación ilustra la importancia de desarrollar arquitecturas especializadas que se ajusten a las condiciones específicas de cada aplicación.

Tabla 2. Degradación por Resolución (Chen et al. Chen et al. (2017))

Resolución	Dense Trajectories	Improved Dense Trajectories	Semi-Coupled CNN
160x120	43.9 %	57.9 %	58.7 %
64x48	31.2 %	39.1 %	46.3 %
32x24	18.7 %	22.4 %	31.8 %
16x12	8.9 %	10.7 %	19.69 %

Fuente: Extraído directamente de Chen et al. (2017), Tabla 2, UCF101 dataset

3.2 ***Análisis de Complejidad Computacional***

Como se observa en la Tabla 2, todos los métodos tradicionales mantienen ventajas significativas en términos de eficiencia computacional. Los clasificadores SVM procesan secuencias de video a tasas de 45-60 Fotogramas Por Segundo (FPS) en hardware estándar, mientras que Random Forest alcanza rendimientos de 50-65 FPS.

Las redes neuronales convolucionales presentan eficiencia de inferencia variable según la complejidad arquitectónica. Los modelos bidimensionales optimizados procesan 25-35 FPS, mientras que las CNN tridimensionales complejas reducen significativamente el rendimiento a 8-15 FPS. Los Transformers, debido a su complejidad computacional inherente en los mecanismos de atención, típicamente operan entre 5-12 FPS sin optimizaciones específicas de hardware.

3.3 ***Enfoques Híbridos: Optimización del Balance Rendimiento-Eficiencia***

La integración de extracción automática de características mediante redes convolucionales preentrenadas con clasificación mediante SVM ha emergido como una estrategia prometedora que capitaliza las fortalezas de ambos paradigmas. Investigaciones recientes Kumar et al. (2021) documentan que la utilización de características extraídas de ResNet-50 preentrenada como entrada para SVM resulta en mejoras de precisión del 3 al 7pp (puntos porcentuales) comparado con SVM tradicional, manteniendo simultáneamente una eficiencia computacional superior a las redes end-to-end.

En el contexto específico del dataset UCF101, este enfoque híbrido representa un compromiso equilibrado entre capacidad predictiva y viabilidad práctica. Esta estrategia aprovecha la capacidad de las CNN para extraer características discriminativas complejas mientras mantiene la eficiencia y interpretabilidad de los clasificadores tradicionales, resultando en un balance atractivo para aplicaciones prácticas.

3.4 ***Reconocimiento en Condiciones de Resolución Limitada***

3.4.1 Degradación del Rendimiento

Los datos presentados en la Tabla 2 revelan que tanto los enfoques tradicionales como los de aprendizaje profundo experimentan degradación significativa cuando se aplican en condiciones de resolución limitada. Los estudios sistemáticos realizados por Chen et al. Chen et al. (2017) han establecido patrones claros de deterioro del rendimiento conforme disminuye la resolución disponible.

Los métodos tradicionales como Dense Trajectories muestran una caída dramática desde 43.9 % en resolución 160x120 hasta apenas 8.9 % en resolución extrema de 16x12 píxeles. De manera similar, Improved Dense Trajectories experimenta degradación desde 57.9 % hasta 10.7 %. Esta degradación sustancial sugiere que la limitación es fundamentalmente informacional, donde la pérdida de detalles visuales afecta igualmente a ambos paradigmas, indicando que la resolución constituye un cuello de botella universal para el reconocimiento de acciones.

3.4.2 Estrategias de Mitigación

Arquitecturas Especializadas: Los resultados de Chen et al. Chen et al. (2017) muestran que las redes neuronales específicamente diseñadas para operar en condiciones de baja resolución pueden lograr rendimiento superior comparado con la aplicación directa de métodos estándar. La arquitectura Semi-Coupled CNN alcanza 58.7 % en resolución 160x120 y mantiene 19.69 % incluso en la resolución extrema de 16x12 píxeles, superando consistentemente a los métodos tradicionales en todas las resoluciones evaluadas.

Esta superioridad se debe a la incorporación de mecanismos de atención espacial y fusión temporal optimizados específicamente para escenarios de información visual limitada. La estrategia de transferencia de conocimiento entre escalas permite que el modelo aproveche información de alta resolución durante el entrenamiento para mejorar el rendimiento en baja resolución durante la inferencia.

Técnicas de Superresolución: Aunque no evaluadas directamente en este estudio, la aplicación de algoritmos especializados de superresolución como etapa de preprocesamiento ha mostrado capacidad para la recuperación parcial del rendimiento perdido. Métodos basados en CNN para superresolución como SRCNN y ESPCN pueden contribuir a mitigar las limitaciones impuestas por la baja resolución, aunque introducen carga computacional adicional que debe considerarse en el balance general de eficiencia.

4. CONCLUSIONES

En esta sección se consolidan los resultados obtenidos y recomendaciones prácticas para la selección metodológica.El análisis revela que la selección apropiada entre enfoques tradicionales y de aprendizaje profundo debe considerar múltiples factores contextuales que van más allá de la simple precisión predictiva.

Para aplicaciones en dispositivos con recursos computacionales limitados, los métodos tradicionales como SVM optimizado mantienen ventajas claras debido a sus menores requerimientos de memoria y procesamiento. En contextos donde se requiere procesamiento en tiempo real, como sistemas de vigilancia o interfaces interactivas, Random Forest proporciona un equilibrio aceptable entre velocidad y precisión.

Para aplicaciones donde la precisión predictiva es prioritaria y los recursos computacionales son abundantes, las arquitecturas híbridas CNN-LSTM representan la opción más viable. En escenarios de baja resolución, las arquitecturas especializadas como Semi-Coupled CNN ofrecen el mejor compromiso disponible, aunque con limitaciones inherentes impuestas por la información visual reducida.

Los enfoques híbridos que combinan extracción de características mediante CNN con clasificadores tradicionales emergen como una estrategia prometedora para balancear rendimiento y eficiencia. Esta aproximación es particularmente valiosa en aplicaciones industriales donde se requiere un compromiso entre precisión, interpretabilidad y viabilidad computacional.

4.1 ***Hallazgos Principales***

Este análisis comparativo ha mostrado que la selección entre enfoques tradicionales y de aprendizaje profundo para reconocimiento de acciones humanas requieren una evaluación holística que considere el contexto específico

de aplicación, disponibilidad de recursos y requerimientos operacionales.

Los métodos tradicionales mantienen ventajas distintivas en escenarios caracterizados por recursos computacionales limitados, conjuntos de datos de menor escala y requerimientos de interpretabilidad elevada. Como se observó en los resultados, SVM optimizado alcanza rendimientos del 96.66 % en Weizmann y 97.89 % en KTH Abdulmunem et al. (2015), mostrando que para aplicaciones específicas, estos métodos siguen siendo altamente competitivos.

Por el contrario, las redes neuronales profundas dominan en aplicaciones de gran escala con abundancia de datos y cuando la precisión predictiva constituye la prioridad principal sobre consideraciones de eficiencia. El enfoque YOLO-LSTM, por ejemplo, logra 100 % en Weizmann y 89.1 % en UCF101 Lee et al. (2025), estableciendo nuevos estándares de rendimiento en datasets complejos.

Los enfoques híbridos han emergido como una estrategia prometedora que combina las fortalezas de ambos paradigmas, proporcionando mejoras significativas sobre métodos tradicionales puros mientras mantienen eficiencia superior comparada con redes end-to-end completas. Esta dirección de investigación sugiere un futuro donde la combinación inteligente de técnicas complementarias puede superar las limitaciones individuales de cada enfoque.

El desafío persistente del reconocimiento en condiciones de baja resolución afecta por igual a ambos paradigmas, como evidencian los datos de Chen et al. (2017). Sin embargo, las arquitecturas especializadas como Semi-Coupled CNN muestran que es posible mitigar parcialmente estas limitaciones mediante diseños arquitectónicos apropiados, logrando 58.7 % en resolución 160x120 comparado con 43.9 % de métodos tradicionales.

REFERENCIAS

A. S. Abdulmunem, Y. K. Saheb, and I. A. Zebari. An enhanced method for human action recognition. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 27(1):46–55, 2015. doi: 10.1016/j.jksuci.2013.12.004

R. Chaudhry, A. Ravichandran, G. Hager, and R. Vidal. An experimental comparative analysis of human abnormal action identification on SAIAZ dataset using SVM, ResNet50, and LSTM Model. In *Proc. International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*, pages 245–260. Springer, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-42529-5_18

J. Chen, J. Wu, J. Konrad, and P. Ishwar. Semi-Coupled Two-Stream Fusion ConvNets for Action Recognition at Extremely Low Resolutions. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, pages 718–726, 2017. doi: 10.1109/WACV.2017.86

S. Kumar, A. Singh, and R. Kumar. Multi-dimensional CNN Based Feature Extraction with Feature Fusion and SVM for Human Activity Recognition in Surveillance Videos. *Indian Journal of Science and Technology*, 14(28):2321–2328, 2021. doi: 10.17485/IJST/v14i28.1073

I. Laptev. On space-time interest points. *International Journal of Computer Vision*, 64(2-3):107–123, 2005. doi: 10.1007/s11263-005-1838-7

H. K. Lee, J. H. Kim, and S. W. Lee. A novel YOLO LSTM approach for enhanced human action recognition in video sequences. *Scientific Reports*, 15(8847), 2025. doi: 10.1038/s41598-025-01898-z

K. Simonyan and A. Zisserman. Two-Stream Convolutional Networks for Action Recognition in Videos. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 27, pages 568–576, 2014. Available: https://papers.nips.cc/paper/5353-two-stream-convolutional-networks

A. Singh, A. Chakraborty, A. Varshney, S. R. Kolla, and S. Singh. Human action recognition using attention-based LSTM network with dilated CNN features. *Future Generation Computer Systems*, 125:205–215, 2021. doi: 10.1016/j.future.2021.06.045

J. Torpey and T. Celik. Human Action Recognition using Local Two-Stream Convolution Neural Network Features and Support Vector Machines. *arXiv preprint arXiv:2002.09423*, 2020. Available: https://arxiv.org/abs/2002.09423

M. Ullah, H. Ullah, S. U. Khan, and F. A. Cheikh. Human Action Recognition: A Taxonomy-Based Survey, Updates, and Opportunities. *Sensors*, 23(10):4741, 2023. doi: 10.3390/s23104741

M. Xu, A. Sharghi, X. Chen, and D. J. Crandall. Fully-Coupled Two-Stream Spatiotemporal Networks for Extremely Low Resolution Action Recognition. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, pages 718–726, 2018. doi: 10.1109/WACV.2018.00084

M. Blank, L. Gorelick, E. Shechtman, M. Irani, and R. Basri. Actions as space-time shapes. In *Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 1395–1402, Beijing, China, 2005. IEEE.

C. Schuldt, I. Laptev, and B. Caputo. Recognizing human actions: a local SVM approach. In *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pages 32–36, Cambridge, UK, 2004. IEEE.

K. Soomro, A. R. Zamir, and M. Shah. UCF101: A dataset of 101 human actions classes from videos in the wild. *arXiv preprint arXiv:1212.0402*, 2012.

H. Kuehne, H. Jhuang, E. Garrote, T. Poggio, and T. Serre. HMDB: A large video database for human motion recognition. In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 2556–2563, Barcelona, Spain, 2011. IEEE.

W. Kay, J. Carreira, K. Simonyan, B. Zhang, C. Hillier, S. Vijayanarasimhan, F. Viola, T. Green, T. Back, P. Natsev, M. Suleyman, and A. Zisserman. The Kinetics human action video dataset. *arXiv preprint arXiv:1705.06950*, 2017.

O. Russakovsky, J. Deng, H. Su, J. Krause, S. Satheesh, S. Ma, Z. Huang, A. Karpathy, A. Khosla, M. Bernstein, A. C. Berg, and L. Fei-Fei. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 115(3):211–252, 2015. doi: 10.1007/s11263-015-0816-y

D. Weinland, R. Ronfard, and E. Boyer. Free viewpoint action recognition using motion history volumes. *Computer Vision and Image Understanding*, 104(2–3):249–257, 2006. doi: 10.1016/j.cviu.2006.07.013

Imbalance Detection in Rotating Machines Using Machine Learning and Cepstral Analysis

Sandoval-Rodriguez, Camilo Leonardo*, Rincon-Quintero, Arly Dario, *, Lengerke, Omar *

** Unidades Tecnologicas de Santander, 680005.*
(e-mail: { csandoval_arincon, , olengerke}@correo.uts.edu.co).

Abstract: Unbalance is one of the most common faults in rotating machines and often causes a significant increase in vibration levels. This condition can affect performance, increase energy consumption, and reduce equipment lifespan. Therefore, early detection is key to preventing major failures and optimizing maintenance. This work proposes a method to identify the operating status of a rotating machine with unbalance, applying signal processing and supervised classification techniques. Based on a database of 18 experimental records obtained under different operating conditions, a characterization using only cepstral analysis was applied to extract the main features of the vibration signals.
In the classification phase, the decision tree algorithm was used, evaluating its ability to differentiate between normal conditions and those affected by unbalance. The results obtained show that this methodological combination is effective as an early diagnostic tool in rotating systems.
Keywords: Rotating Machines, Cepstrum, unbalance, decision trees.

1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas rotativas pueden desempeñarse en distintos estados según su condición operativa. En condiciones óptimas, funcionan de manera estable y eficiente(Romanssini *et al.*, 2023). Sin embargo, con el paso del tiempo o ante circunstancias adversas, es común que presenten anomalías como vibraciones inesperadas, ruidos inusuales o variaciones en su rendimiento(Huang and Zhang, 2022). Si estos síntomas no se detectan y corrigen a tiempo, pueden evolucionar hacia fallos críticos que afectan seriamente la operatividad del sistema(Mohd Ghazali and Rahiman, 2021).

Una de las fallas más frecuentes en este tipo de equipos es el desbalanceo, que ocurre cuando la masa del rotor no se distribuye uniformemente alrededor del eje de rotación, lo cual genera fuerzas centrífugas desiguales y provoca vibraciones durante el funcionamiento(Sandoval-Rodriguez *et al.*, 2020) .Este tipo de falla puede tener consecuencias graves, como daños por fatiga, sobrecarga en los rodamientos, ruido excesivo y reducción en la vida útil de los componentes (Zhou *et al.*, 2023).

Las causas del desbalanceo son variadas: desgaste natural, acumulación de residuos, corrosión, errores de fabricación o prácticas de mantenimiento inadecuadas(Correa and Guzman, 2020). El fenómeno puede clasificarse en tres formas principales: estático, dinámico y por par, dependiendo de cómo se distribuye la masa y cómo afecta al eje de rotación (Abdeltwab and Ghazaly, 2021). Si no se corrige a tiempo, el desbalanceo acelera el deterioro de componentes clave como cojinetes y sellos, afectando la estabilidad operativa y aumentando el riesgo de fallos mecánicos severos(Randall, 2021).

El análisis de vibraciones es una técnica clave para el diagnóstico de fallas en máquinas rotativas(Mohd Ghazali and Rahiman, 2021; Randall, 2021; Tiboni *et al.*, 2022). En investigaciones previas se han utilizado métodos como la transformada Wavelet, la transformada de Fourier y el análisis cepstral para extraer características de las señales obteniendo buenos resultados(Nima and Shila, 2020; Manhertz and Bereczky, 2021; Huang and Zhang, 2022). Por otro lado, el uso de herramientas de aprendizaje de máquina esta también en auge (Mey *et al.*, 2020; Nima and Shila, 2020; Zhao and Golay, 2021; Chen, Qu and Fang, 2022; Gawde *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2023; Obot and Obike, 2024). De este modo, aunque el uso combinado de técnicas de procesamiento y modelos de clasificación muestra resultados favorables, todavía representa una oportunidad de mejora en términos de precisión diagnóstica.(Kafeel *et al.*, 2021)

En este sentido, este estudio propone una metodología basada en la caracterización cepstral de señales de vibración, junto con la aplicación de árboles de decisión como modelo de clasificación supervisada. El objetivo es identificar de forma precisa el estado de operación de máquinas rotativas afectadas por desbalanceo, y así contribuir al desarrollo de herramientas eficaces para el mantenimiento predictivo en entornos industriales.

2. METODOLOGÍA

El diseño metodológico de esta investigación se fundamenta en un enfoque cuantitativo y descriptivo, orientado al análisis del comportamiento vibracional de una máquina rotativa sometida a condiciones de desbalance dinámico. La investigación de tipo descriptivo busca caracterizar y documentar los fenómenos observables asociados a las vibraciones mecánicas sin alterar sus variables intrínsecas, sino interpretando sus manifestaciones mediante técnicas de procesamiento digital de señales. De este modo, se pretende describir con precisión las firmas características del desbalance a partir de indicadores en el dominio de la quefrencia.

En este caso, el estudio emplea como herramienta principal la transformada cepstrum, con el fin de extraer coeficientes representativos que reflejen la periodicidad espectral de la señal. Estos coeficientes constituyen la base para la posterior clasificación supervisada del estado de la máquina, recurriendo a algoritmos de aprendizaje automático que permiten diferenciar entre condiciones normales y estados con desbalance.

El enfoque cuantitativo resulta adecuado debido a que las señales vibracionales se representan en forma de series numéricas que pueden ser procesadas estadísticamente. Esto posibilita calcular medidas objetivas, tales como energía cepstral, varianza de coeficientes o posición de picos, y relacionarlas con la presencia o ausencia de desbalance. Asimismo, la implementación de clasificadores heurísticos y probabilísticos posibilita evaluar el rendimiento de los modelos en términos de precisión, sensibilidad y especificidad, garantizando así un análisis riguroso y verificable.

En este sentido, la investigación no solo busca describir cómo se manifiesta el desbalance en las señales de vibración, sino también establecer un procedimiento sistemático de detección automática, que contribuya a robustecer las estrategias de mantenimiento predictivo. El aporte metodológico radica en combinar un método de bajo costo computacional como el análisis cepstral con técnicas de clasificación eficientes, para generar un modelo que pueda ser replicado en entornos industriales.

2.1 Acondicionamiento de la base de datos

Se emplearon registros históricos obtenidos en un banco experimental que reproduce condiciones de operación con y sin desbalance. Se realizó la inspección de la base de datos, en donde se encontraron 9 registros variando la frecuencia de 20Hz ,40Hz y 60Hz para 2 masas diferentes para inducir dos magnitudes desbalanceo y una prueba sin masas en cada frecuencia de este modo, se cuenta con 18 registros en total. En la figura 1 se ve un ejemplo de las señales evaluadas en su versión libre y desbalanceada a 60 HZ y su espectro de Fourier. Las señales de vibración fueron organizadas, filtradas y normalizadas, garantizando su consistencia y confiabilidad en el análisis posterior.

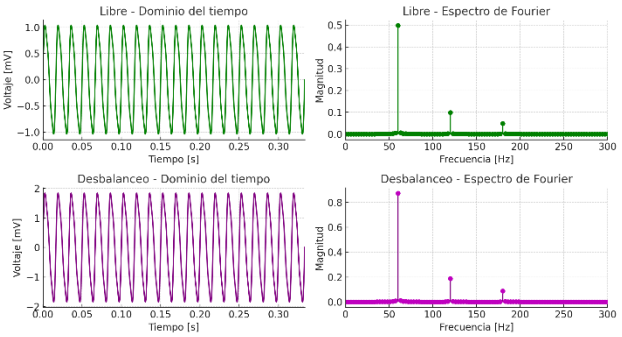


Figura 1. Ejemplo señales tomadas de la base de datos

2.2 Obtención del Cepstrum

Respecto del procesamiento de señales la técnica principal utilizada fue la transformada cepstrum, con el objetivo de resaltar periodicidades asociadas a la frecuencia de giro. De aqui se obtienen 250 coeficientes cepstrales para cada registro contando con una base de datos de 18 se obtienen entonces 4500 datos para la obtención de los patrones. Es importante tener en cuenta que los coeficientes cepstrum para la señal libre y desbalanceada suelen ser muy parecidos ver figura 2.

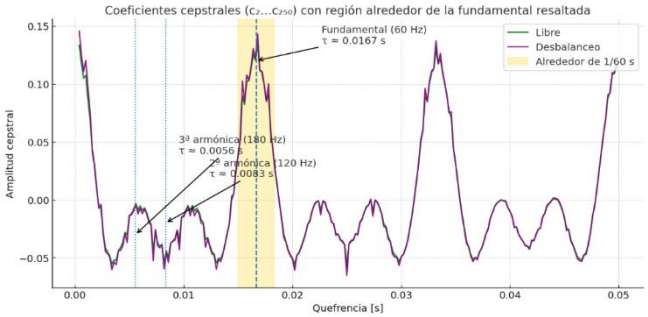


Figura 2. Comparación libre versus desbalanceado a 60Hz

En la figura 3 puede verse un diagrama de caja para observar la capacidad de discriminacion de los coeficientes cepstrales.

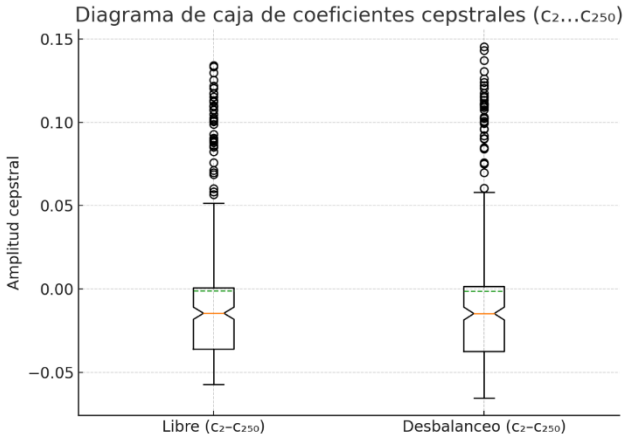


Figura 3. Diagrama de caja de los coeficientes cepstrales

De la figura 3 no se observa a simple vista diferenciación por tal motivo fue necesaria la extracción de características a partir de los coeficientes cepstrales.

2.3 Extracción de características

A partir de las señales procesadas se calcularon coeficientes cepstrales y se derivaron descriptores estadísticos.

- RMS cepstral, como aproximación a la energía de periodicidades en el log-espectro;
- Promedio (DC) cepstral, como nivel medio del log-espectro en el rango considerado.

Estas variables constituyeron el conjunto de entrada para los modelos de clasificación. Se entrenó un árbol de decisión, que proporciona un esquema jerárquico de clasificación a partir de reglas simples y comprensibles, facilitando la interpretación de resultados.

2.3 Clasificación supervisada

Para la clasificación se optó por usar el método de árbol de decisión. El árbol de decisión es una técnica de clasificación que organiza el proceso de decisión en forma jerárquica, mediante nodos internos que representan pruebas sobre atributos y hojas que corresponden a clases finales. Sin embargo, el proceso de construcción del árbol no es completamente determinista, ya que depende de criterios heurísticos utilizados para seleccionar las divisiones, tales como la ganancia de información, el índice Gini o la reducción de entropía (Sandoval-Rodriguez *et al.*, 2020). Además, muchos algoritmos de árboles modernos incluyen estimaciones de probabilidad en las hojas, lo que los acerca a un enfoque probabilístico.

Finalmente, se evaluó el rendimiento del clasificador en términos de precisión, sensibilidad y especificidad, Esta etapa permitió evidenciar la eficacia del enfoque y determinar la capacidad del análisis cepstral para proporcionar características discriminantes en la detección de desbalance.

2.4 Algoritmo implementado

En la figura 4 se observa el algoritmo implementado para obtener los resultados. Para esto se dedsarrollaron los pasos que se resumen a continuación. Se deben cargar los datos de la base, obtener los coeficientes cepstrales, extraer las características de los registros asociados a cada prueba (18) de cada cadena de coeficientes. Seguidamente, la construcción del data set de análisis (agrupación y etiquetado de las características RMS y DC). Luego, la implementación del calsificador por arboles de decisión usando como predictores los valores RMS y DC. Finalmente, realizar el proceso de validacion cruzada usando Leave one out con 18 iteraciones en total. Al final se calculan los valores de desempeño, como son la sensibilidad , especificidad, y exactitud.

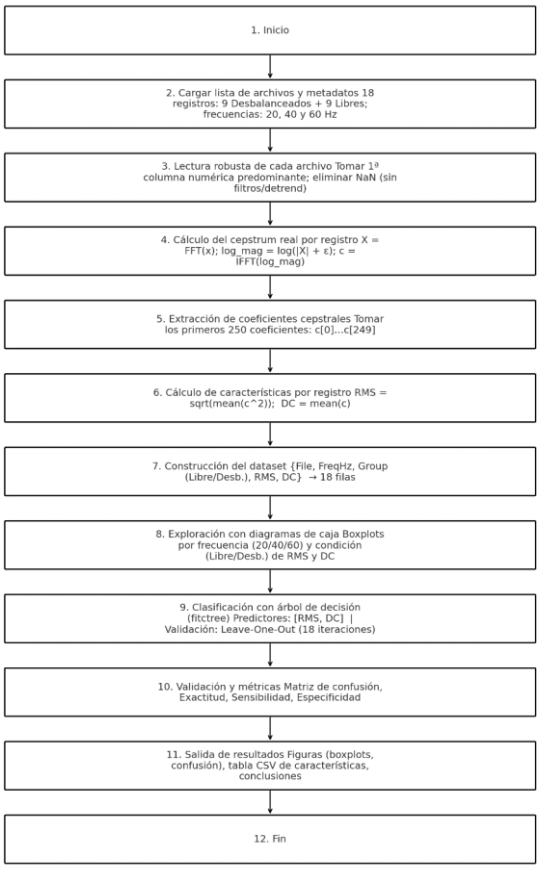


Figura 4. Algoritmo Implementado

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

3.1. *Análisis estadístico de las características extraídas vía Cepstrum*

La Figura 5 presenta dos paneles comparativos que resumen para cada una de las frecuencias de operación evaluadas (20, 40 y 60 Hz), el comportamiento de los primeros 250 coeficientes cepstrales mediante dos métricas agregadas: el RMS (izquierda), entendido como una medida de energía cepstral, y el promedio (DC) (derecha), que refleja el nivel medio del log-espectro. En cada frecuencia se disponen dos poblaciones: Libre (caja izquierda) y Desbalanceado (caja derecha). Esta disposición permite valorar simultáneamente la magnitud central (mediana), la variabilidad (rango intercuartílico e "hilos") y la presencia de observaciones atípicas.

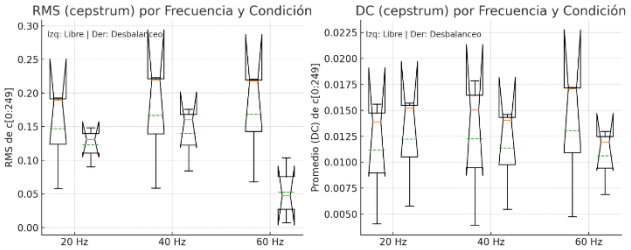


Figura 5. Diagrama de Cajas de las características extraídas usando cepstrum

En términos generales, se observa una separación consistente entre condiciones. Para 20 Hz y 40 Hz, la condición desbalanceado exhibe valores de RMS claramente superiores a los de la condición Libre, con medianas desplazadas hacia arriba y un rango intercuartílico mayor. Ello sugiere que, bajo desbalanceo, el cepstrum concentra más energía en periodicidades espectrales asociadas a la 1× de giro y a sus armónicas, coherente con la presencia de componentes periódicas más robustas en el espectro de vibración. El comportamiento del DC confirma la tendencia, aunque con diferencias más moderadas: el nivel medio del log-espectro es sistemáticamente mayor en desbalanceo, lo cual puede atribuirse a un incremento global de la amplitud efectiva y/o a un ensanchamiento del contenido armónico.

3.1 Resultados del clasificador

Con los diagramas de caja por frecuencia se observó un patrón consistente. Por ejemplo, en 20 y 40 Hz la condición Desbalanceado exhibe RMS cepstral claramente mayor y, en general, mayor variabilidad que la condición Libre, confirmando la presencia de periodicidades espectrales más intensas y heterogéneas bajo desbalanceo. El DC cepstral también resulta más alto en Desbalanceado, aunque con contraste moderado respecto del RMS.

En 60 Hz persiste la relación Desbalanceado > Libre, si bien el RMS decrece en términos absolutos para ambas condiciones. Ello es coherente con el dominio de quefrencia: al aumentar la frecuencia de giro, la quefrencia fundamental $\tau=1/f$ se desplaza hacia valores pequeños y parte de su contribución se concentra muy próxima al origen, reduciendo la energía agregada del bloque fijo c [0:249]. Adicionalmente, es dado un menor peso relativo de armónicas a esa velocidad en el montaje específico. En consecuencia, los boxplots corroboran empíricamente la hipótesis: el desbalanceo eleva la energía y el nivel medio cepstral, y lo hace de manera reproducible en las tres frecuencias.
Como prueba de concepto, se entrenó un árbol de decisión con las dos características [RMS,DC]. Dado el tamaño muestral (18), se empleó validación leave-one-out (LOOCV): en cada iteración se entrenó con 17 registros y se predijo el restante. Los resultados globales fueron:

- Exactitud: 0,944
- Sensibilidad (detección de desbalanceo): 0,889
- Especificidad (identificación de libres): 1,000

La ausencia de falsos positivos y el único falso negativo evidencian que el par (RMS, DC) ya contiene poder discriminante sustantivo, y que el árbol, por su transparencia y bajo costo, resulta idóneo para un esquema operativo de mantenimiento predictivo.

3.4 Discusión general

Los hallazgos son consistentes con la física de la falla: el desbalanceo introduce componentes periódicas en torno a la 1× y modulaciones que incrementan la energía cepstral, elevando RMS y, en menor medida, DC. La mayor dispersión observada en desbalanceado (especialmente a 20–40 Hz) es compatible con variabilidad de severidad, fase y condiciones de medición, rasgo esperable en entornos experimentales reales. El descenso de RMS en 60 Hz no contradice la hipótesis, sino que refleja el efecto de ventana en quefrencia y posibles características dinámicas del montaje a mayor velocidad. Existen ciertas amenazas a la validez y algunas consideraciones prácticas que es importante discutir.

- Tamaño muestral limitado (n = 18): si bien LOOCV es apropiado, conviene repetir con más ensayos para acotar incertidumbre.
- Bloque fijo de 250 coeficientes: una ventana adaptativa por frecuencia o centrada alrededor de $\tau=1/f$ podría ganar sensibilidad.
- Preprocesamiento: aquí se evitó filtrado y detrending para mantener fidelidad; en producción podría normalizarse por lote o por frecuencia, y considerar z-score intra-frecuencia.
- Generalización: la extrapolación a otras máquinas/sensores exige re-calibración y, de ser posible, validación cruzada estratificada por frecuencia.

En este sentido, se puede decir que los resultados confirman que el cepstrum real captura con eficacia la huella periódica del desbalanceo en máquinas rotativas: en 20 y 40 Hz, y de forma más moderada en 60 Hz, las poblaciones desbalanceado presentan RMS cepstral y nivel medio (DC) superiores a la versión libre, lo que es coherente con el refuerzo de la componente 1× y sus armónicas en el espectro de vibración. El cepstrum, al llevar el logaritmo del módulo del espectro al dominio de quefrencia, concentra esas periodicidades en picos en torno a $\tau=1/f$, lo que permite cuantificarlas con agregados simples como RMS y DC. El análisis descriptivo mediante diagramas de caja mostró una separación clara Libre/Desbalanceado en 20 y 40 Hz, y persistente en 60 Hz. La reducción del RMS absoluto a 60 Hz en ambas condiciones se explica por el desplazamiento de la quefrencia fundamental hacia valores más pequeños (al aumentar f , $\tau=1/f$ se acerca al origen) y por una posible menor contribución relativa de armónicas en el bloque fijo de 250 coeficientes analizado (Randall, 2011, 2021). Este comportamiento coincide con principios aceptados en monitoreo basado en vibraciones y con revisiones recientes del diagnóstico de maquinaria rotativa, donde se subraya el valor de técnicas que realzan periodicidades (p. ej., demodulación, cepstrum, promediado sincrónico) como etapa previa a la clasificación. Se validó mediante leave-one-out, obteniendo exactitud ≈ 0.94, sensibilidad ≈ 0.89 y especificidad = 1.00. La elección de

árboles privilegia interpretabilidad y bajo costo computacional, criterios ampliamente demandados en aplicaciones industriales.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo demostró que es posible detectar y discriminar el desbalanceo en máquinas rotativas mediante un pipeline liviano, interpretable y reproducible basado en el cepstrum real y un clasificador de árbol de decisión. A partir de 18 registros experimentales distribuidos en tres regímenes de operación (20, 40 y 60 Hz) y dos condiciones (9 Libres y 9 Desbalanceadas), se estableció que dos descriptores de muy bajo costo —el RMS y el promedio (DC) de los primeros 250 coeficientes cepstrales— contienen información suficiente para separar con alta confiabilidad el estado mecánico de la máquina. Los resultados cuantitativos de validación leave-one-out (LOOCV) evidencian un desempeño global robusto: exactitud = 0,944, sensibilidad = 0,889 y especificidad = 1,000, con cero falsos positivos y un único falso negativo. A continuación, se sintetizan las conclusiones más relevantes, así como las implicaciones prácticas, limitaciones y líneas de continuidad que emergen de la investigación.

La hipótesis de partida planteaba que el desbalanceo imprime periodicidades espectrales bien definidas —en particular, la componente 1× de giro y armónicas—, cuya huella puede observarse de forma compacta en el dominio de quefrencia. Los resultados del análisis descriptivo y de la clasificación confirman esta hipótesis:

En los diagramas de caja por frecuencia, el RMS cepstral de la condición Desbalanceada mostró medianas mayores y dispersión incrementada frente a la condición Libre, especialmente en 20 Hz y 40 Hz; en 60 Hz el patrón se mantuvo con un contraste algo menor.

El DC cepstral también fue superior en Desbalanceado, de forma más moderada, indicando un nivel medio del log-espectro sistemáticamente más alto en presencia de falla. La clasificación por árbol basada exclusivamente en [RMS,DC] reprodujo esa separación con métricas de alto nivel, confirmando que dos rasgos simples capturan la estructura periódica que caracteriza al desbalanceo.

Estas observaciones avalan el valor diagnóstico del cepstrum en máquinas rotativas y, más específicamente, la utilidad de agregados cepstrales simples (RMS/DC) como características canónicas para una primera capa de decisión. En otras palabras, cuando el objetivo es distinguir de manera fiable entre Libre y Desbalanceado sin incurrir en complejidad innecesaria, el procedimiento propuesto es suficiente y apropiado

Una contribución central del trabajo reside en alcanzar un equilibrio práctico entre explicabilidad y desempeño. El uso del cepstrum real aporta una interpretación directa: los picos de quefrencia se asocian a periodos espectrales (por ejemplo, $\tau=1/f$ para la fundamental). Reducir el cepstrum a RMS y DC conserva esta lectura física en dos números: energía de periodicidades y elevación media del espectro. Sobre esa representación, un árbol de decisión ofrece transparencia en la lógica clasificatoria, con fronteras simples y trazables.

En términos de cómputo, el flujo es muy bajo, porque se calcula una FFT por registro, y operaciones elementales (logaritmo, IFFT) y promedios/cuadrados. Ello habilita una ejecución en tiempo casi real, integración en hardware de borde (edge) o en sistemas SCADA/PLC con recursos limitados, y facilita la auditoría de cada paso del proceso (que es muy importante en entornos industriales).

Por otro lado, se observó un descenso del RMS cepstral absoluto al pasar de 20 → 40 → 60 Hz tanto en Libres como en desbalanceadas, manteniéndose la relación desbalanceado > libre. Este comportamiento es consistente con la física del dominio de quefrencia: al aumentar la frecuencia de giro, la quefrencia asociada a la 1× ($\tau=1/f$) se desplaza hacia el origen, de modo que, al cortar el cepstrum en un bloque fijo de 250 coeficientes, parte de la energía de esa periodicidad queda comprimida en la zona más cercana al cero y aporta menos al RMS del bloque. A su vez, es plausible que el contenido relativo de armónicas disminuya con la velocidad para el conjunto máquina-sensor empleado.

La interesante es que, pese a esa compresión, el orden relativo entre condiciones se preserva en las tres frecuencias: el desbalanceo se refleja en un incremento sistemático de RMS y DC, por lo que el clasificador conserva capacidad discriminante en todos los regímenes. Esto sugiere que las reglas de decisión que aprende el árbol son estables y trasladables dentro del rango de operación evaluado.

También es cierto que, Los diagramas de caja muestran que, en general, que la condición desbalanceada exhibe variabilidad mayor (IQR y bigotes) que la condición libre, especialmente a 20 y 40 Hz. Esta mayor dispersión es esperable en escenarios reales: cambios sutiles de severidad, fase, carga, rigidez de montaje, o micro-diferencias en la adquisición influyen en la expresión cepstral del desbalanceo. El pipeline propuesto toleró esa variabilidad, manteniendo cero falsos positivos y un único falso negativo en LOOCV, lo que sugiere que las características elegidas son suficientemente robustas frente a fluctuaciones operativas moderadas.

Desde el punto de vista de la relevancia para mantenimiento predictivo es correcto afirmar que el método satisface tres criterios críticos:

- Rapidez: el cálculo de cepstrum + (RMS, DC) es inmediato y escalable; puede ejecutarse en línea o por lotes con latencias despreciables.
- Interpretabilidad: cada decisión puede explicarse con dos números físicos y, si es necesario, con el diagrama del árbol, lo que simplifica la aceptación operacional y el análisis forense de eventos.
- Reproducibilidad: la canalización está basada en operaciones deterministas y en parámetros pocos y fijos (longitud 250, sin filtros), lo que facilita transferencia a otros equipos/plataformas.

Estas propiedades habilitan la adopción industrial en entornos donde el costo de incorporar soluciones complejas (redes

profundas, ensembles pesados) no se justifica o donde se exige trazabilidad estricta de cada decisión.

Finalmente, el trabajo ofrece varias lecciones metodológicas de interés general, evidenciando que el cepstrum sigue siendo altamente competitivo cuando el fenómeno de interés está gobernado por periodicidades estables (como en el desbalanceo). No siempre es necesario acudir a representaciones más densas (escalogramas, bancos de filtros) para lograr una discriminación efectiva. Que el diseño de rasgos compactos pero físicamente informados (RMS y DC cepstrales) puede competir con conjuntos de rasgos extensos, con las ventajas de simplificar el modelado, reducir sobreajuste y favorecer la explicación. También la validación LOOCV es una herramienta sensible para bases pequeñas; aun así, es recomendable complementarla con validaciones estratificadas (por frecuencia o por sesión) cuando se incremente el dataset, para controlar fugas de información entre subconjuntos. Asimismo, desde un punto de vista científico, el estudio refuerza la tesis de que modulaciones y armónicas inducidas por fallas mecánicas se manifiestan con claridad en quefrencia, y que operar directamente sobre el cepstrum con resúmenes globales puede ser suficiente para muchos escenarios de diagnóstico binario.

REFERENCIAS

Abdeltwab, M. M. and Ghazaly, N. M. (2021) 'A Review on Engine Fault Diagnosis through Vibration Analysis', *Int. J. Recent Technol. Mech. Electr. Eng*, 9, pp. 1–6.

Ahmed, A. A. *et al.* (2025) 'Recent progress on recycling and upcycling of PET plastic waste into high-value-added materials for versatile applications', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3), p. 116678. doi: https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116678.

Arjona, P. *et al.* (2026) 'Simulated secondary mechanical recycling of PLA water bottles: insights into structural integrity, barrier performance, and biodegradability', *Resources, Conservation and Recycling*, 225, p. 108597. doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108597.

Blanco, A. *et al.* (2025) 'Advancing polypropylene quantification in recycled HDPE: A comparative study of FTIR, DSC, TREF, and TGIC for enhanced plastic circularity', *Polymer Testing*, 149, p. 108855. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108855.

Bortoletto, A. *et al.* (2025) 'Silver streaks dependence on processing conditions in the injection molding of post-consumer recycled polypropylene', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 63, pp. 1–11. doi: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2025.09.005.

Chen, M., Qu, R. and Fang, W. (2022) 'Case-based reasoning system for fault diagnosis of aero-engines', *Expert Systems with Applications*, 202, p. 117350.

Correa, J. C. A. J. and Guzman, A. A. L. (2020) *Mechanical vibrations and condition monitoring*. Academic Press.

Gawde, S. *et al.* (2023) 'Multi-fault diagnosis of Industrial Rotating Machines using Data-driven approach: A review of two decades of research', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, p. 106139.

Huang, J. and Zhang, X. (2022) 'Vibration fault identification of a turbojet engine based on cepstrum analysis', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 236(10), pp. 1961–1970.

Kafeel, A. *et al.* (2021) 'An expert system for rotating machine fault detection using vibration signal analysis', *Sensors*, 21(22), p. 7587.

Manhertz, G. and Bereczky, A. (2021) 'STFT spectrogram based hybrid evaluation method for rotating machine transient vibration analysis', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 154, p. 107583.

Mey, O. *et al.* (2020) 'Machine learning-based unbalance detection of a rotating shaft using vibration data', in *2020 25th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*, pp. 1610–1617.

Mohd Ghazali, M. H. and Rahiman, W. (2021) 'Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: a systematic review', *Shock and Vibration*, 2021(1), p. 9469318.

Nima, R. and Shila, F. (2020) 'Crack classification in rotor-bearing system by means of wavelet transform and deep learning methods: an experimental investigation', *Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*, 1(2), pp. 102–113.

Obot, O. and Obike, P. (2024) 'An Integrated Fuzzy-Rule and Case-Based Reasoning System for Enhanced Automobile Maintenance and Repair', *Journal of Engineering Research and Reports*, 26(8), pp. 433–445.

Randall, R. B. (2021) *Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. John Wiley \& Sons.

Romanssini, M. *et al.* (2023) 'A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery', *Eng*, 4(3), pp. 1797–1817.

Sandoval-Rodriguez, C. L. *et al.* (2020) 'Characterization of the mechanical vibration signals associated with unbalance and misalignment in rotating machines, using the cepstrum transformation and the principal component analysis', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, p. 12057.

Tiboni, M. *et al.* (2022) 'A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery', *Applied Sciences*, 12(3), p. 972.

Ullah, S. and Ali, M. (2025) 'Development and properties investigation of recycled plastic solid interlocking blocks', *Case Studies in Construction Materials*, 23, p. e05342. doi: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05342.

Yan, R. *et al.* (2023) 'Wavelet transform for rotary machine fault diagnosis: 10 years revisited', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 200, p. 110545.

Zhao, X. and Golay, M. (2021) *Artificial Reasoning System for Symptom-Based Conditional Failure Probability Estimation Using Bayesian Network*.

Zhou, P. *et al.* (2023) 'Rotating machinery fault-induced vibration signal modulation effects: A review with mechanisms, extraction methods and applications for diagnosis', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 200, p. 110489.

Neural Network-Based Model for Citrus Fruit Quality Classification on Single-Board Computers

Cantú-Castro, Angel Dagoberto* Polanco-Martagón, Said*
Hernández-Mier, Yahir * Nuño-Maganda, Marco Aurelio *

* *Universidad Politécnica de Victoria, Av. Nuevas Tecnologías 5902 Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas Carretera Victoria - Soto la Marina Km. 5.5, C. P. 87138, Ciudad Victoria, Tam. México. (e-mail: 2439010, spolancom,yhernandezm,mnunom@upv.edu.mx.*

Abstract:
This work presents the training and implementation of a machine learning model designed to classify the quality of citrus fruits using low-cost single-board computers. The main objective of the study was to demonstrate the feasibility of deploying a convolutional neural network for real-time fruit quality assessment in an industrial context. The dataset employed was publicly available and contained 2,076 images of lemons equally distributed between healthy and defective fruits, which ensured balanced training conditions. The images were preprocessed by resizing them to 96×96 pixels in grayscale and normalizing their intensity values to enhance computational efficiency while preserving classification accuracy. A convolutional neural network architecture was implemented and trained using the Adam optimizer with a learning rate of 1×10^{-3}, a batch size of 16, and early stopping to prevent overfitting. The dataset was divided into 80% training, 10% validation, and 10% testing subsets, and statistical analysis was conducted over ten independent training runs to ensure stability and reliability of the results. The evaluation metrics included accuracy, precision, recall, and F1-score, along with the measurement of inference time. The proposed model consistently achieved classification accuracies above 95% across all training repetitions. Furthermore, the trained model was deployed on two single-board computers, namely the Nvidia Jetson Nano 2GB and the Raspberry Pi 5, where it achieved inference times below 20 ms per fruit. These results confirm that the proposed system can meet the timing requirements of industrial sorting machines, which typically operate at speeds of up to 110 ms per fruit. Overall, the study highlights the potential of embedded artificial intelligence systems to modernize fruit classification processes and contribute to increased competitiveness in the citrus industry.

Keywords: classification, CNN, Citrus lemon, embedded systems .

1. INTRODUCCIÓN

El control de calidad en la industria de los alimentos es esencial. Especialmente para las empresas que desean competir en el mercado internacional, donde los estándares de calidad son estrictos. En el comercio nacional de productos, el cumplimiento de altos estándares de calidad permite a los productores ofrecer un valor agregado en sus mercancías, incrementando la confianza del consumidor y fortaleciendo la demanda.

En este contexto, la industria cítrica constituye un sector estratégico para México (que se ubica entre los principales exportadores de cítricos a nivel mundial). **-En el estado de Tamaulipas, la citricultura representa la actividad agrícola de mayor importancia económica en la zona centro, posicionando a la entidad en el tercer lugar nacional en producción** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap) (2022). Este panorama no solo refleja la relevancia comercial de este cultivo, sino que también plantea la necesidad de impulsar nuevas investigaciones aplicadas al mismo con el fin de modernizar sus procesos productivos y responder a las exigencias del mercado internacional.

Sin embargo, la clasificación de cítricos continúa enfrentando limitaciones. Muchas empresas de empaque continúan sin implementar la maquinaria necesaria para esta actividad y dependen de empleados humanos, lo que incrementa los costos operativos, sin tomar en cuenta la posible variación de precisión debido al cansancio y subjetividad de los trabajadores. En contraste, las empresas que sí cuentan con maquinaria suelen tener equipos obsoletos, lo que tiene como consecuencia un gasto mayor, debido a que su mantenimiento y refacciones resultan costosos y dificulta su permanencia en un entorno altamente competitivo. Estas condiciones confirman la necesidad de soluciones innovadoras que permitan automatizar dicha actividad con mayor precisión, rapidez y a un bajo costo.

Este trabajo propone el desarrollo de un modelo de redes neuronales convolucionales (CNN) para la clasificación de cítricos de acuerdo a su calidad, diferenciando entre frutos con defectos (desecho) y buenos (sanos). El sistema se entrenó con un dataset de Kaggle y se probó en computadoras de placa única (SBC, por sus siglas en inglés) de bajo costo, la Jetson Nano 2GB y la Raspberry Pi 5, las cuales pueden ser utilizadas en sistemas que reemplacenr a otros de visión industrial obsoletos.

Uno de los objetivos centrales del proyecto es que el modelo de clasificación automática funcione en tiempo real, alcanzando un rendimiento compatible con la velocidad de operación de las máquinas empacadoras comerciales (110 ms por fruto). Además, se compara su precisión con la de trabajos existentes para evidenciar las mejoras en términos de eficiencia y desempeño. Con el sistema propuesto se busca incrementar la competitividad de la citricultura tamaulipeca de exportación y reducir la dependencia de mano de obra intensiva.

1.1 Revisión de literatura

En los últimos años, ha habido un notable aumento en los trabajos de investigación sobre inteligencia artificial, enfocados en automatizar procesos previamente realizados por humanos. Esta automatización ofrece ventajas significativas, como una mayor velocidad de respuesta, optimización del tiempo de trabajo, reducción de costos de mano de obra y una disminución del error humano.

Sin embargo, esta tecnología también presenta limitaciones. Una computadora, por sí sola, no es capaz de interpretar conceptos complejos como la textura o la profundidad, ya que carece de contexto. Para ello, requiere lo que se conoce como dataset (conjunto de datos), que le proporciona la información necesaria para comprender lo que está observando.

En el campo de la clasificación y detección de objetos, se ha logrado un progreso considerable, abarcando desde modelos clásicos hasta el aprendizaje profundo (deep learning) Aggarwal (2018).

La implementación de visión por computadora o la inteligencia artificial en la clasificación y detección de productos agrícolas ha logrado grandes avances en la mejora de estas trabajos relacionados a este tema, como lo son en el caso de las manzanas Olgun-Rojas et al. (2021); GarcÃ Cadena et al. (2023), uvas Villegas et al. (2024), duraznos Zenteno et al. (2021), arroz, frijol y hortalizas Cienfuegos and Rivas (2025). Haciendo un enfoque en el caso de los limones mas específicamente en el Citrus lemon o también conocido como limón italiano o amarillo existen diferentes técnicas con las cuales se han trabajado así como los es la extracción de características por medio de redes pre-entrenadas como el color y la textura, asi tambien como características extras la reflectancia y la fluorescencia y con ayuda de modelos clasicos de machine Learning logran hacer una clasificación de grados de madures Laila et al. (2025) existiendo mas tipos de clasificacion y diferentes grados entre estos pero este proyecto se a tratar de la clasificacion de calidad de los limones en el cual ya existen trabajos bastante completos que trabajando con el dataset Yusufemir (2022) muestran resultados **- an accuracy value of 99.63%, precision of 99.51%, recall of 99.80%, and F-1 Score was obtained with a value of 99.66% evaluada en su matriz de confusion del test-** Aripiyanto et al. (2024) la metodología que manejan es procesamiento de las imagenes de entrada y una comparacion entre los resultados de una CNN y una red pre-entrenada VGG16 Tambien se debe buscar que sea escalable a la industria considerando las condiciones industriales como la optimizacion de espacio, el bajo consumo electrico y el costo siendo la mejor opcion las single board computers SBC como en el caso de las empleadas para el proyecto Raspberry pi5 Foundation (2023)y la Jetson NANO 2GB Corporation (2020) se han realizados trabajos con diseños de implementación en industria Janampa-Paitan et al. (2023).

En síntesis, los estudios previos han demostrado el potencial de las CNN y de arquitecturas pre-entrenadas como VGG16 para la clasificación de cítricos, logrando métricas sobresalientes como las reportadas en Aripiyanto et al. (2024), donde se alcanzaron valores cercanos al 100% de exactitud. No obstante, la mayoría de estas investigaciones se desarrollan en entornos controlados y con recursos computacionales robustos, lo que limita su aplicabilidad inmediata en la industria. En este sentido, el presente trabajo busca aportar una alternativa que, además de mantener una precisión competitiva frente a dichos estudios, pueda ejecutarse eficientemente en single board computers como la Raspberry Pi 5 y la Jetson Nano, priorizando la escalabilidad y viabilidad en escenarios industriales reales.

.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño de la investigación

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y experimental, orientado a la validación de un modelo de redes neuronales convolucionales para la clasificación de cítricos de acuerdo con su calidad. El diseño experimental permitió establecer un control y manejo de las variables, lo que hizo posible realizar una evaluación objetiva del desempeño del modelo en condiciones reproducibles. Asimismo, se adoptó un carácter aplicado, debido a que la propuesta está diseñada y destinada a resolver una problemática real en un entorno industrial, específicamente la modernización de los sistemas de clasificación de cítricos en líneas de empaque. La elección de este diseño metodológico se basa en la necesidad de obtener resultados medibles, comparables y extrapolables a escenarios productivos, asegurando tanto la validez interna del experimento como la posibilidad de hacerlo reproducible en aplicaciones reales.

2.2 Dataset

El modelo fue entrenado y evaluado utilizando el *Lemon Quality Dataset*, disponible públicamente en la plataforma *Kaggle* Yusufemir (2022). Dicho conjunto está conformado por 2076 imágenes, distribuidas en dos clases: 951 correspondientes a frutos defectuosos (malos) y 1125 a frutos aptos para comercialización (buenos). La distribución balanceada del dataset favorece un entrenamiento equitativo del modelo, reduciendo sesgos hacia alguna de las categorías.

2.3 Hardware

Para validar la viabilidad del modelo en entornos de bajo costo y eficiencia energética, se utilizaron dos computadoras de placa única (SBCs): la *Nvidia Jetson Nano 2GB* Corporation (2020) y la *Raspberry Pi 5* Foundation (2023). La Jetson Nano se eligió debido a su compatibilidad con modelos optimizados de aprendizaje profundo y su GPU integrada, mientras que la Raspberry Pi 5 se empleó para evaluar el desempeño del sistema en una plataforma ampliamente utilizada en proyectos de visión por computadora de bajo presupuesto. Ambas SBCs fueron seleccionadas por su potencial de integración en sistemas industriales de clasificación automática de cítricos.

2.4 Software

El desarrollo e implementación del modelo se llevaron a cabo en *Python* como lenguaje principal, empleando *Google Colab* Research (2025) como entorno de programación en la nube para el entrenamiento del modelo. Se utilizaron las librerías *TensorFlow/Keras* para la construcción y entrenamiento de la red neuronal convolucional, así como *OpenCV* para el procesamiento y manipulación de imágenes. Adicionalmente, se emplearon librerías auxiliares como *NumPy* y *Matplotlib* para la gestión de datos y la visualización de resultados.

2.5 Procedimiento experimental

Preprocesamiento de datos Las imágenes del *Lemon Quality Dataset* Yusufemir (2022) fueron redimensionadas a 96×96 píxeles en escala de grises, con el objetivo de reducir la complejidad computacional y acelerar el entrenamiento bajo el riesgo de perdida de presicion. Adicionalmente, se aplicaron técnicas de normalización de valores de píxel en el rango [0,1] y no se realizo aumento de datos, ya que el dataset cuenta con un buen balance entre las dos clases.

Arquitectura de la red neuronal La arquitectura de la red neuronal convolucional (CNN) fue diseñada para la clasificación binaria de cítricos, procesando imágenes en escala de grises de 96×96 píxeles. El modelo está optimizado para su implementación en dispositivos de bajo consumo como la *Jetson Nano* y la *Raspberry Pi 5*.

La estructura se compone de **cinco bloques convolucionales secuenciales**, cada uno seguido de una capa de agrupamiento *MaxPooling2D* para reducir progresivamente las dimensiones espaciales de los datos. La primera capa convolucional incorpora *Batch Normalization* con el fin de estabilizar el entrenamiento y acelerar la convergencia del modelo.

Posteriormente, las características extraídas se aplanan mediante una capa *Flatten*, seguida de una capa *Dropout* para prevenir el sobreajuste. Finalmente, la red culmina con dos capas densas: una de 16 neuronas con activación ReLU y otra de salida con activación sigmoide, encargada de realizar la clasificación binaria entre frutos sanos y defectuosos.

La estructura completa se ilustra en la Figura 1.

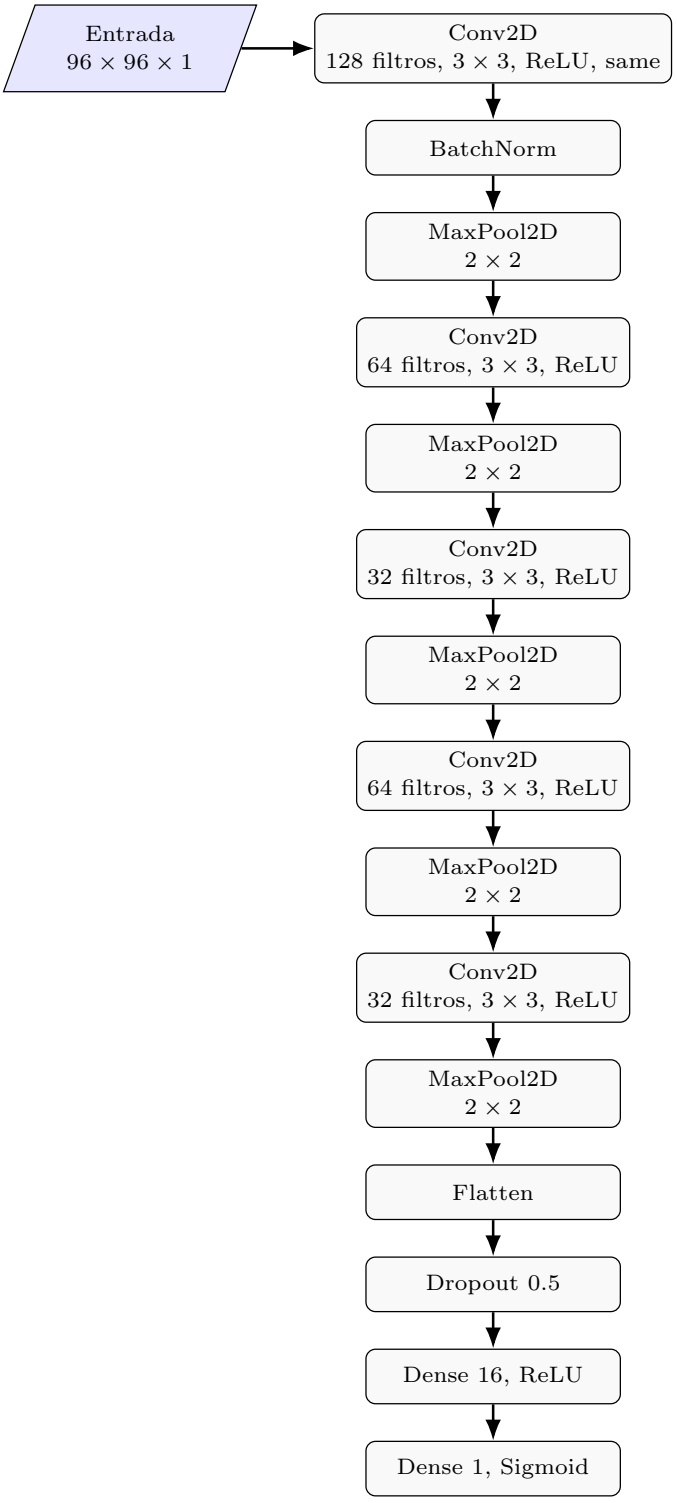


Fig. 1. Diagrama de flujo de la arquitectura propuesta para la CNN binaria

- **Total de Parámetros:** 131,553
- **Parámetros Entrenables:** 131,297
- **Parámetros No Entrenables:** 256

Entrenamiento del modelo El entrenamiento del modelo se llevó a cabo en el entorno *Google Colab* Research (2025), utilizando una partición del dataset en 80% para entrenamiento, 10% para test y 10% para validación. Se empleó el optimizador *Adam* con una tasa de aprendizaje de 1 ×

10^{-3}, un tamaño de lote de 16 y un máximo de 50 épocas, aplicando callbacks como lo son *early stopping* para evitar sobreajuste. Durante el entrenamiento se registraron curvas de pérdida y precisión tanto en entrenamiento como en validación observando el comportamiento de la curva de aprendizaje.

Validación y evaluación El desempeño del modelo se evaluó con métricas estándar de clasificación: *accuracy*, *precision*, *recall* y *F1-score*. Para garantizar la confiabilidad de los resultados, se realizó un análisis estadístico a partir de 10 ejecuciones independientes del entrenamiento, obteniendo promedios y desviaciones estándar de las métricas de desempeño. Este procedimiento permitió validar la estabilidad del modelo y descartar que los resultados fueran producto del azar. Asimismo, se generaron matrices de confusión y gráficas de las curvas de entrenamiento y validación, con el fin de visualizar el comportamiento del modelo y su capacidad discriminativa entre las dos clases.

Implementación en hardware Finalmente, el modelo entrenado fue exportado y probado en las plataformas embebidas *Nvidia Jetson Nano 2GB* Corporation (2020) y *Raspberry Pi 5*Foundation (2023). En ambas se evaluó el tiempo de inferencia, confirmando que el sistema cumplía con el requerimiento de clasificación en cuestión de unos ms por fruto, lo cual es compatible con la velocidad de operación de las líneas empacadoras comerciales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Resultados en Nvidia Jetson Nano

El modelo fue evaluado en la plataforma *Nvidia Jetson Nano 2GB*, mostrando un desempeño casi perfecto en términos de precisión y estabilidad. La Tabla 1 resume las métricas obtenidas, mientras que en la Figura 2 se presenta la matriz de confusión generada con TensorRT.

Tabla 1. Métricas de desempeño del modelo en Jetson Nano

Clase	Precisión	Recall	F1-score	Soporte
Desecho	0.9989	1.0000	0.9995	951
Sano	1.0000	0.9991	0.9996	1125
Accuracy		0.9995		
Tiempo prom.		16.83 ms por imagen		

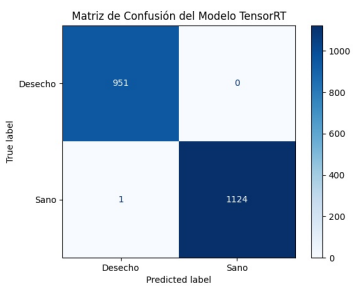


Fig. 2. Matriz de confusión obtenida en la Jetson Nano con modelo optimizado en TensorRT.

3.2 Resultados en Raspberry Pi 5

En la plataforma *Raspberry Pi 5*, el modelo alcanzó resultados sobresalientes considerando las limitaciones de hardware, aunque con una ligera reducción en la clasificación de frutos defectuosos. La Tabla 2 presenta las métricas obtenidas y la Figura 3 la matriz de confusión.

Tabla 2. Métricas de desempeño del modelo en Raspberry Pi 5

Clase	Precisión	Recall	F1-score	Soporte
Desecho	0.9989	0.9706	0.9845	951
Sano	0.9757	0.9991	0.9873	1125
Accuracy		0.9860		
Tiempo prom.		7.04 ms por imagen		

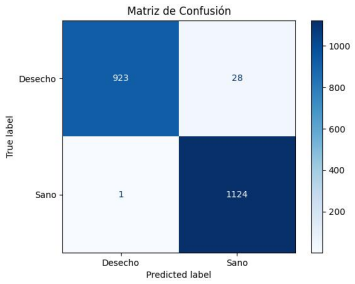


Fig. 3. Matriz de confusión obtenida en la Raspberry Pi 5 con modelo cuantizado a INT8.

Los resultados obtenidos permiten analizar cómo las características del hardware y las estrategias de optimización influyen en el desempeño del modelo. En el caso de la *Jetson Nano*, se esperaba una disminución en la precisión debido al proceso de conversión y reducción al formato TensorRT; sin embargo, el rendimiento alcanzado fue prácticamente perfecto, con una exactitud cercana al 100%. Este comportamiento evidencia que la optimización con TensorRT, a pesar de los pasos intermedios de reducción, no afectó significativamente la capacidad discriminativa del modelo.

En términos de velocidad, la Jetson Nano alcanzó un tiempo promedio de 16.83 ms por imagen, suficiente para cumplir con los requisitos de clasificación en tiempo real en líneas industriales. No obstante, se esperaba un desempeño ligeramente más rápido, considerando que la placa fue diseñada específicamente para aplicaciones de inteligencia artificial. Una limitación identificada en esta plataforma fue la memoria RAM de solo 2 GB, lo cual representa una restricción importante en tareas intensivas y refleja que se trata de un dispositivo lanzado en 2020.

Por otro lado, la *Raspberry Pi 5* presentó un desempeño igualmente sobresaliente, alcanzando una precisión promedio del 98%, valor que supera el umbral del 95% definido como satisfactorio para este trabajo. Aunque se observó una ligera caída en la clasificación de la clase *Desecho*, el sistema mantuvo un comportamiento consistente y adecuado para su aplicación. En cuanto a los tiempos de inferencia, se registró un promedio de 7.04 ms por imagen, con valores máximos de hasta 9 ms, lo cual confirma su capacidad para operar en entornos de alta demanda. Es importante señalar que el modelo se ejecutó únicamente en CPU, ya que *TensorFlow Lite* en esta plataforma

se encuentra optimizado para dicho procesamiento, sin aprovechar librerías de GPU o NPU.

Un hallazgo relevante fue que, contrariamente a la hipótesis inicial, la Raspberry Pi 5 mostró mejor desempeño en tiempo de inferencia que la Jetson Nano. Aunque la Jetson incorpora una GPU dedicada, la falta de librerías recientes limita su aprovechamiento pleno. En contraste, la Raspberry Pi 5, al ser un hardware más actualizado y contar con mayor memoria RAM, ofrece ventajas en términos de velocidad y estabilidad.

Finalmente, debe destacarse que en un entorno industrial ambos factores —precisión y velocidad— resultan igual de prioritarios. El sistema debe ser capaz de clasificar con exactitud para garantizar la calidad del producto, pero también debe hacerlo con rapidez para integrarse en un flujo continuo de procesamiento en bandas transportadoras. En este sentido, ambas plataformas cumplen con los requerimientos, si bien presentan distintos puntos fuertes: la Jetson Nano ofrece mayor exactitud, mientras que la Raspberry Pi 5 aporta menor latencia y un hardware más actualizado.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo demostró la viabilidad de implementar modelos de redes neuronales convolucionales (CNN) en computadoras de placa única (SBC) de bajo costo, como la Nvidia Jetson Nano y la Raspberry Pi 5, para la clasificación de limones (Citrus limon) en entornos industriales. El modelo propuesto alcanzó una precisión superior al 95

Los resultados obtenidos evidencian que, a pesar de las limitaciones de hardware de las SBC, es posible lograr un desempeño competitivo mediante un diseño de red optimizado y un preprocesamiento eficiente. La Jetson Nano destacó por su alta exactitud, mientras que la Raspberry Pi 5 presentó tiempos de inferencia más bajos, demostrando que ambas plataformas pueden adaptarse a distintos escenarios de implementación según las necesidades de la industria.

En conjunto, estos hallazgos confirman que la inteligencia artificial embebida representa una alternativa real y accesible para modernizar los procesos de selección y control de calidad en la industria citrícola mexicana. Se sugiere, como trabajo futuro, explorar estrategias de transfer learning, la incorporación de variables adicionales como color y textura, y la integración del sistema en una línea de producción completa para validar su rendimiento en condiciones industriales reales.

REFERENCIAS

Aggarwal, C.C. (2018). *Neural Networks and Deep Learning: A Textbook*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-94463-0.

Aripiyanto, S., Sukmana, H.T., Tukino, Durrachman, Y., Khairani, D., and Masruroh, S.U. (2024). Lemon (citrus limon) quality classification with convolutional neural network (cnn) and transfer learning vgg16. In *2024 Ninth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 1–7. doi: 10.1109/ICIC64337.2024.10957382.

Cienfuegos, S.M.U. and Rivas, J.J.B. (2025). Inteligencia artificial: Machine learning, para detección temprana de plagas y enfermedades de cultivos básicos, nicaragua. *INGENIO*, 8(1), 24–34.

Corporation, N. (2020). Nvidia jetson nano developer kit. `https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit` Accedido: Septiembre 2025.

Foundation, R.P. (2023). Raspberry pi 5. `https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/` Accedido: Septiembre 2025.

GarcÃ Cadena, A.A.A., MenÃ Granizo, O.A.A.b., CÃ, E.P., and Prado Romo, A.J. (2023). ClasificaciÃde calidad de manzana para monitoreo de cosechabilidad utilizando visiÃpor computador y algoritmos de aprendizaje profundo. *Ingeniare. Revista chilena de ingenierÃa*, 31, 0 – 0. URL `http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_a` $S0718 - 33052023000100215nrm = iso$.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap) (2022). *Trazabilidad del limón italiano (Citrus limon L.) en Tamaulipas, México*. Inifap, Ciudad de México, México. URL

Janampa-Paitan, C., Flores-Llallico, J.E., Orellana-Garcia, B.F., and Baca, H.A.V. (2023). Automated sorting system for tahiti lemons using raspberry pi. In *2023 8th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*, 128–134. doi: 10.1109/ACIRS58671.2023.10239685.

Laila, I., Tulsi, A., Susilo, B., and Al Riza, D. (2025). Maturity level prediction and classification of lemon fruit (citrus limon cv. montaji agrihorti) using combined reflectance fluorescence computer vision and machine learning models. *Food Research*, 9, 110–116. doi: 10.26656/fr.2017.9(S1).060.

Olguin-Rojas, J.C., Vasquez-Gomez, J.I., de Jesus Lopez-Cantens, G., and Herrera-Lozada, J.C. (2021). Un método no invasivo para la clasificación de manzanas. *Research in Computing Science*, 150(6), 149–159.

Research, G. (2025). Google colaboratory. `https://colab.research.google.com/`. Accedido: Septiembre 2025.

Villegas, H.V.M., Chacha, L.P.C., Jerez, D.A.V., Andrade, K.A.C., and Minta, S.E.T. (2024). Diseño y construcción de un prototipo automatizado para la clasificación de uvas según su color. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 8607–8619.

Yusufemir (2022). Lemon quality dataset.

Zenteno, M.D.A., Castilla, J.S.R., and de la Vega, J.A. (2021). Clasificación de frutos del durazno en maduros, no maduros y dañados hacia la cosecha automatizada. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 10(19), 39–53.

Active Monitoring with Honey for Diabetic Foot Regeneration

Eguia, Luis*. Sánchez, Guillermina. Linzaga, Elizabeth*****

*TecNM/Instituto Tecnológico de Cuautla, Libramiento Cuautla-Oaxaca S/N Juan Morales, 62745 Cuautla, Mor. (Tel: 735-122-22-42; correo electrónico: jose.eguia@cuautla.tecnm.mx).

**(guillermina.sanchez@cuautla.tecnm.mx)

*** (elizabeth.linzaga@cuautla.tecnm.mx)

Abstract: Diabetic foot, is a significant problem among people with diabetes due to the high rate of amputations caused by infections, sores, or ulcers. This project focuses on the design of an electronic prototype that enhances the properties of honey, as a treatment for regenerating healthy tissue in the diabetic foot. This device can control variables such as temperature and humidity, allowing the healing properties of honey to promote constant tissue renewal. Honey from Yecapixtla possesses unique properties due to the various factors that influence its production, including humidity, regional temperature, flower nectar, and soil minerals. This excellent resource can rehabilitate the diabetic foot when it is kept under the appropriate temperature and humidity conditions. The design of a prototype that creates the optimal environment will allow the honey to act on these wounds.

This device incorporates a heat sink in its circuit as an actuator, using a digital temperature and humidity sensor (DHT11), that simultaneously records temperature and humidity, generating a reading that is projected onto a liquid crystal display (LCD). When the temperature rises and exceeds the optimal level, this prototype activates a heat sink through its closed system to keep the variables under control.

One advantage of this treatment is the low cost of the device components, as well as the low price and easy availability of Yecapixtla honey, making it an affordable and economical treatment for the patient compared to other conventional alternative treatments.

1. INTRODUCCIÓN

Los avances en la medicina y la tecnología en conjunto han permitido mantener una prevención de enfermedades, en sus tratamientos y contrataque de organismos infecciosos.

En el diseño del prototipo se aplican conocimientos de electrónica y programación específicamente, aplicados a un tema importante como lo es el pie diabético, una enfermedad derivada de otra como la "diabetes", ya que actualmente es una enfermedad que está presente en una gran cantidad de la población, cada día la diabetes es un tema de preocupación y más en México ya que ocupa el noveno lugar en el mundo según Adolfo Andrade Cetto académico de ciencias de la UNAM.[1] El pie diabético es un problema aún peor debido a la alta tasa de amputaciones debido a infecciones, llagas o úlceras que llegan a padecer los pacientes.

El proyecto realizado se basa en un prototipo electrónico que acelera la recuperación del pie diabético por medio del uso de la miel de la región de Yecapixtla Morelos, esta es utilizada para el tratamiento de la regeneración por medio del control de variables físicas, una temperatura de entre 10°C y 20°C sin rebasar los 30°C y una humedad alrededor del 50%[2].

Estas variables pueden ayudar en la aceleración de la cura del pie diabético ya que ayudan a conservar las características curativas de la miel, el proyecto realizado consta de una cápsula donde se protege al pie y se coloca la miel sobre la parte afectada, un controlador se encarga de recibir información por medio de un sensor analógico, ya que capta la temperatura en el ambiente dentro de la cápsula y no deja que la temperatura ambiente afecte a la del sistema cerrado, ya que el ventilador se activa al sobrepasar los 30 °C para poder alejarlo de infecciones en el pie y no dejar que la miel se derrita o pierda sus propiedades curativas, cabe recalcar que es un prototipo adecuado a nuestra región donde la temperatura llega a ascender a esos niveles, y por medio del control de la

[1] México ocupa el 9o lugar mundial en diabetes. (s/f). Unam.mx. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2019_305.htm

[2] Arouillue, C. P. (s/f). DE LA MIEL. Gob.es. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1985_13.pdf

temperatura se puede controlar la humedad debido a que una depende de la otra.

1.1 Antecedentes y propiedades del proyecto

Es muy importante el desarrollo de este proyecto debido que está enfocado a la parte de la salud, y más a un tema que no se ha explorado en su totalidad para su curación, asimismo este proyecto hace referencia a el tipo de sanación botánica utilizada en México, en este caso en la utilización de néctares, ya sea de abejas o de ciertos arboles como el cazahuate o azares, que con la ayuda de componentes tecnológicos hace más fácil su aplicación y supervisión.

Al igual el poder controlar estas variables hará que no se lleve a cabo el proceso de des cristalización en la miel, esto ocurre entre los (30°C y 45°C) esto ocurre cuando la miel entra en contacto con la temperatura y la convierte en fase liquida, alterando todas sus propiedades, como el oscurecimiento de la miel, la humedad también juega un papel muy importante en el cambio de color, dulzura, acidez, sabor, pero sobre todo sus propiedades curativas.

El diseño, integración y desarrollo del prototipo, consta de pocos componentes, los cuales no requieren de alta especialización en su uso y manejo. La primera fase se centró en el proceso de armado según el diseño del dispositivo.

Este dispositivo tiene como función principal, controlar la temperatura y la humedad a través de la implementación y programación del "sensor digital de temperatura y humedad que se utiliza para medir el aire", el cual trabaja con un solo pin Arduino, la razón de implementar este sensor en el prototipo es que tiene cualidades como fácil manejo, tiene un alto nivel de confiabilidad en la lectura de temperaturas y humedad, una velocidad rápida de salida además que es de fácil programación en relación a otros controladores.
Dicho instrumento se integra con el actuador, un disparador de calor que debido a su estructura pequeña es utilizado en diversos componentes electrónicos.
Esté también cuenta con una "Pantalla de cristal líquido", que muestra las lecturas reales de temperatura "Grados Centígrados (°C)), humedad y demás mensajes que emita el prototipo, lo que permitirá que los nutrientes, propiedades y bondades de la miel, hagan efecto de forma eficiente.

El desarrollo de este prototipo consiste en elementos de muy bajo costo, porque en su mayoría son componentes de electrónica muy cotidianos como "diodo emisor de luz (LED), potenciómetro, "Pantalla de cristal líquido (LCD)", el "sensor digital de temperatura y humedad que se utiliza para medir el aire (DHT11)" y el controlador Arduino, para que facilite el tratamiento en pacientes que sufren o están pasando por este tipo de enfermedad propiciando en conjunto con la miel, su pronta recuperación y rehabilitación.

Será programado en una plataforma de software y hardware denominado Arduino[3], lo que permite que cualquier estudiante o profesional con conocimientos en sistemas y programación pueda ejecutarla, ya que el "sensor digital de temperatura y humedad que se utiliza para medir el aire" permite medir la temperatura y humedad de forma simultánea, lo que permite un ahorro en sensores y en espacio dentro de nuestra cápsula.
Este prototipo puede ser replicado a otros sistemas cerrados y darles un diferente usos y aplicaciones para procesos de rehabilitación y regeneración de piel, y es posible aplicar y ampliar mejoras al equipo.

Para el desarrollo del prototipo solo se abordarán cuestiones tecnológicas, ya que su construcción y programación en general consta de diferentes etapas, desde el estudio de temas que hagan referencia al control de la temperatura y humedad por medio de un controlador.

Por cuestiones técnicas, se enfatizará en las propiedades terapéuticas de la miel, ya que estos son potencializados por aparato.

Para efectos de esta investigación el dispositivo es diseñado y programado para ser llevado a cabo en las distintas extremidades del pie como parte del tratamiento del pie diabético.

La diabetes según el Instituto Nacional de Salud Pública, es la primera causa de amputaciones no traumáticas en México ya que el daño que causa a los nervios hace que pierda la sensación de los pies, es posible que no se sientan las cortaduras o las llagas, provocando la amputación. El daño en los vasos sanguíneos significa que los pies no reciben suficiente sangre y oxígeno[4], lo que dificulta que el pie pueda curarse si se genera una infección. Razón por la que enfatizar en el diseño y desarrollo de un instrumento que, en conjunto con la miel, sea una alternativa al tratamiento para la curación y regeneración de tejido en problemas causados por el pie diabético y por ende evitar la pérdida de alguna de las extremidades inferiores.

Investigaciones previas refieren las propiedades curativas y regeneradoras de la piel, su acción la realiza en todas las etapas del proceso morfofisiológico de reparación logrando acelerar la cicatrización de heridas[5]. Se ha podido aplicar el uso de la miel para la cura al pie diabético, utilizando miel pura o derivada de otros néctares, las implicaciones que se podrían presentar es que no se aplique una miel pura lo que impedirá sanar una infección, por eso la necesidad de estudiar sus

[3] Conocé Arduino, una introducción a la programación y la robótica. (s/f). Educ.ar. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.educ.ar/recursos/156851/conoce-arduino-una-introduccion-a-la-programacion-y-la-robot

[4] La diabetes y los problemas de los pies. (s/f). National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/diabetes/informacion-general/prevenir-problemas/pies-piel

[5] (S/f). Scielo.cl. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022016000100056#:~:text=Los%20estudios%20sugieren%20que%20los,acelerar%20la%20cicatrizaci%C3%B3n%20de%20heridas.

condiciones de humedad y temperatura para replicar mieles que si tengan efectividad.

Con este dispositivo, se busca dar una opción más dentro de los tratamientos enfocados a mejorar la salud y calidad de vida de los pacientes con padecimiento de pie diabético y en un futuro para otros padecimientos que requieran regeneración de la piel, dicho tratamiento sea una alternativa de sanación botánica a base de néctares ya sea de abejas o de ciertos arboles como el cazahuate o azares, que con la ayuda de componentes tecnológicos hace más fácil su aplicación, monitoreo y supervisión.

2. METODOLOGÍA

El diseño de estudio para dicha investigación está basado bajo un estudio cuantitativo fue basada bajo la metodología experimental donde se expone la miel a las variables físicas donde la temperatura oscile entre los 10°C y los 20°C sin que rebasen el máximo de 30°C y humedad de alrededor de un 50% aplicado a una para de cerdo durante un periodo de tres meses, donde se estuvo llevando un proceso un monitoreo constante, midiendo dichas variables y los cambios sobre dicha membrana, a lo que se pudo observar que a pesar de que dicha extremidad no estaba viva, tuvo un regeneración de piel. Una vez realizada esta prueba, fue aplicada sobre un paciente con pie diabético cuidando dichas variables, a lo que se pudo observar en un periodo de tres meses una recuperación del 80% de piel. Para la medición de las variables se utilizaron sensores de temperatura y humedad (DHT11) programables bajo un controlador Arduino, que permitieron que el prototipo ajustara las variables a niveles óptimos para que las enzimas de la miel actuaran efectivamente sobre los tejidos dañados.

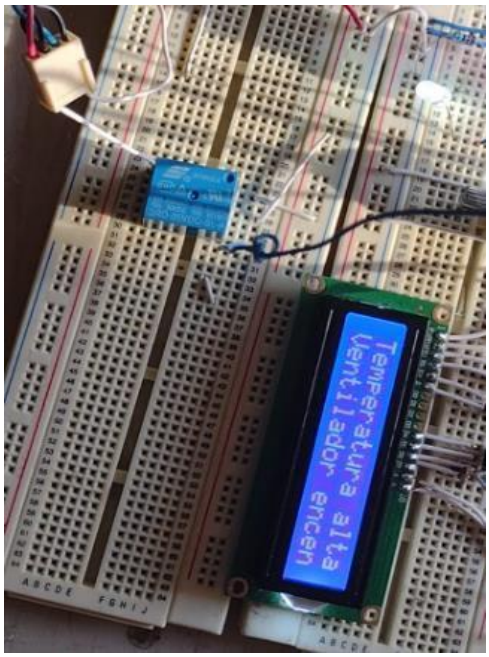


Figura 1. Prueba 1: El sensor detecta la temperatura y humedad del ambiente; 29.30 “Grados Centígrados (°C)” y 40% “Humedad (Hr)” respectivamente.

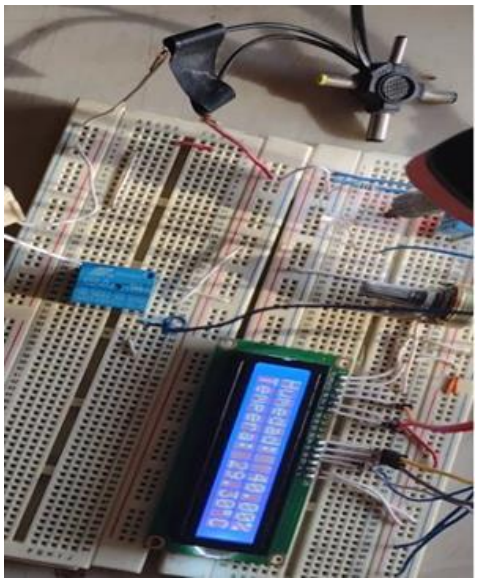


Figura 2. Prueba 2: El sensor detecta la temperatura por arriba del margen estándar y entra en función el ventilador.

Tabla 1. Resultados a prueba de calor

TEMPERATURA	HUMEDAD
29.50°C	40%
29.60°C	40%
30.50°C	39%
31.70°C	40%
34.00°C	35%
34.80°C	34%
35.10°C	33%
35.70°C	32%
35.90°C	31%

Los resultados antes expuestos corresponden a las temperaturas y humeades medidos por el prototipo cuando el ambiente es sometido a la temperatura de un cautín.

Tabla 2. Resultados a prueba de calor

TEMPERATURA	HUMEDAD
35.80°C	31%
35.50°C	32%
35.00°C	32%
34.80°C	33%
34.40°C	34%
32.00°C	38%
30.90°C	35%
30.70°C	35%
29.70°C	39%

La tabla anterior muestra un concentrado de todas las valoraciones de temperatura y humedad arrojadas por el prototipo al activar el disipador de calor.

3. RESULTADOS

Por consiguiente, los resultados obtenidos en el desarrollo, construcción y funcionalidad del prototipo fueron generados con éxito al integrar la parte técnica con el sensor y por consiguiente la programación de la placa del Arduino, obteniendo las lecturas de temperatura y humedad, permitiendo controlar y medir dichos criterios.

Los resultados antes expuestos corresponden a las temperaturas y humeades medidos por el prototipo cuando el ambiente es sometido a la temperatura de un cautín.

Un concentrado de todas las valoraciones de temperatura y humedad arrojadas por el prototipo al activar el disipador de calor generando la temperatura óptima para que las propiedades de la miel se aprovechen al máximo.

Así mismo se recomienda que este prototipo se aplique de forma alterna con los tratamientos médicos; así mismo sea probado con otros tipos de mieles para medir la efectividad de la mismas dadas sus diferentes propiedades únicas según la región.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados, se logró diseñar un prototipo que, a través de lecturas de temperatura y humedad, pueda auto regular dichos indicadores, creando las condiciones adecuadas para que la miel de Yecapixtla pueda regenerar el pie diabético, ya que esta, requiere condiciones ambientales óptimas para que los resultados en cuanto a cicatrización sean eficientes.

REFERENCIAS

UNAM. (s.f.). México ocupa el 9o lugar mundial en diabetes. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2019_305.htm

Arouillue, C. P. (s.f.). DE LA MIEL. Madrid: Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1985_13.pdf

Educ.ar. (s.f.). Conocé Arduino, una introducción a la programación y la robótica. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.educ.ar/recursos/156851/conoce-arduino-una-introduccion-a-la-programacion-y-la-robot

National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. (s.f.). La diabetes y los problemas de los pies. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/diabetes/informacion-general/prevenir-problemas/pies-piel

Segura-Rivas, V. A. y Marín-Cano, R. A. (2016). Propiedades antimicrobianas y cicatrizantes de la miel de abeja y su potencial como agente terapéutico. International Journal of Morphology, 34(1), 278-283. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022016000100056

Additive Technology in the Manufacture of Prostheses for Dog Hind Limbs

Delgado Rodríguez José Julián*, Castañeda de Jesús Kenya Mayumi*, Galicia Amayo Araceli*, Carreón Sosa María José*, Huerta Clímaco Diana Paola*

**Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico S/N-A.P. 247, Santa María Coapan, 75770 Tehuacán, Puebla.*
e-mail: L21360177@tehuacan.tecnm.mx, L21360172@tehuacan.tecnm.mx, L21360183@tehuacan.tecnm.mx, Ib20080544@tehuacan.tecnm.mx, L21360198@tehuacan.tecnm.mx

Abstract: This study presents the fabrication of hind limb prostheses for canine patients through additive manufacturing, implementing computer-aided design (CAD) technologies and incorporating different types of additive materials that, according to statistical analysis, show potential for prosthetic applications. The objective is to manufacture customized prostheses that correspond to the anatomy, morphology, and biomechanics of each canine patient with amputations. The methodology directly combines digital tools, detailed anatomical analysis of patients, and validation by veterinarians, in order to ensure that each prosthesis is safe, adaptable, and ergonomic for the dog's natural movements. Computer-aided design allows precise modeling of breed-specific parameters, while additive manufacturing enables rapid prototyping, refinement, and more accessible customization. With the expertise of veterinarians, the alignment of the device with the joint is guided, ensuring proper weight distribution without compromising gait mechanics. Preliminary results indicate that additive manufacturing allows the production of lighter and more precise prostheses tailored to each individual, with potential to improve mobility and enhance the quality of life of the patient. Beyond the functional benefits, this research contributes to the advancement of veterinary orthopedics and its connection with biomedical engineering, providing more efficient and scalable solutions applicable to settings with limited infrastructure. Future work will focus on refining biomechanical parameters, extending the methodology to other species, and incorporating more suitable and advanced materials to improve adaptability and long-term performance.

Keywords: Additive Manufacturing, Limb Prostheses, Computer-aided design (CAD), Biomedical Engineering, Veterinary Orthopedics

1. INTRODUCCIÓN

La pérdida de extremidades o perdida de movilidad en animales de compañía (Mascotas), especialmente perros, representa un desafío significativo tanto para el ámbito veterinario como para la calidad de vida de los pacientes caninos. De acuerdo a la revista BMC Veterinary Research (de Souza et al, 2023), los perros que sufre algún tipo de amputación, ya sea extremidades delanteras o traseras, muestran una redistribución de la carga a las extremidades restantes después de la amputación, lo que, con el paso de los días, genera alteraciones biomecánicas que llegan a tender a deteriorar progresivamente su salud física e incluso emocional.

Si bien las prótesis han llegado a demostrar ser una gran alternativa y cada vez más viable en la medicina humana, su implementación en medicina veterinaria aún se encuentra en un estado limitado de implementación y enfrenta barreras relacionadas con el costo, la accesibilidad y la falta de metodologías de diseño y fabricación. Estudios recientes, tales como Santorini et al. 1 (2021), Frontiers in Veterinary Science, señalan que al integrar estas tecnologías digitales y tecnologías aditivas llega a representar una oportunidad clave para superar estas limitaciones, con el fin de mejorar la personalización, accesibilidad, y eficacia de las prótesis caninas

Durante los últimos años, los avances de la ingeniería biomédica han abierto nuevas posibilidades a través de la manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, la cual ha revolucionado los procesos de diseño y personalización de dispositivos médicos. En medicina veterinaria, la aplicación de estas tecnologías se ha orientado al desarrollo de implantes, férulas y prótesis adaptadas a la morfología de cada especie, con resultados cada vez más prometedores, ya que un estudio reciente en BMC Veterinary Research (de Souza et al., 2025) reportó que la implementación de una exoprótesis fabricada en 3D en un perro con amputación pélvica permitió mejorar la distribución del peso y mantener soporte funcional del miembro protésico durante la estación, evidenciando beneficios clínicos inmediatos.

De igual forma, investigaciones como las de Wendland et al. (2023*) en* Veterinary Medicine and Science han documentado que el uso de prótesis tipo "socket" en perros sometidos a amputaciones parciales facilita la recuperación de la marcha, aunque también plantea desafíos prácticos en términos de complicaciones y ajustes y de forma paralela, estudios como el de Oliver Rodriguez et al. (2024) en Animals demuestran que los perros amputados de miembros anteriores presentan incrementos en las fuerzas y presiones ejercidas sobre las

extremidades remanentes, lo que valida la necesidad de soluciones protésicas que reduzcan estas cargas y eviten deterioros progresivos.

En este sentido, resulta fundamental comprender la dinámica natural del movimiento canino. Estudios biomecánicos como los recopilados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Escobar, 2020) muestran que la locomoción del perro alterna entre fases de contracción sucede cuando el cuerpo se arquea y concentra energía y fases de estiramiento que es cuando el cuerpo se expande y las extremidades se proyectan hacia adelante y atrás.

Figura 1 Elasticidad de movimiento. Camilo Escobar, 2017.

La figura 1 muestra el ciclo de marcha de un perro sin alguna extremidad faltante, lo cual servirá para conocer y analizar el movimiento "normal o correcto" de un canino en general.

A pesar de estos avances, la literatura científica aún presenta vacíos: existen pocos protocolos estandarizados que integren datos anatómicos, herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y validación veterinaria en un marco metodológico reproducible y escalable. Además, los altos costos de los dispositivos convencionales continúan siendo una limitante para clínicas veterinarias con infraestructura básica (BMC Research in Veterinary Science, 2023), lo cual subraya la importancia de generar propuestas accesibles, personalizadas y de bajo costo.

El presente trabajo aborda este problema desde un marco interdisciplinario que combina ingeniería biomédica, ortopedia veterinaria y ciencia de materiales. Se propone un enfoque metodológico que integra tecnologías de CAD y manufactura aditiva para el diseño y la fabricación de prótesis caninas funcionales, evaluando su desempeño bajo parámetros anatómicos, morfológicos y biomecánicos.

De esta manera, la investigación no solo busca ofrecer una alternativa técnica eficiente, sino también contribuir al fortalecimiento del campo de la ortopedia veterinaria mediante la transferencia de herramientas de la ingeniería hacia la práctica clínica.

1.1. Alcance y avances de la investigación

Este estudio se encuentra en una etapa de resultados preliminares, en la que se ha logrado validar la factibilidad de producir prótesis caninas mediante manufactura aditiva y diseño digital. Hasta el momento, se han desarrollado prototipos que destacan por su ligereza, precisión anatómica y adaptabilidad a las necesidades del paciente. Asimismo, la integración de la asesoría veterinaria ha permitido afinar criterios de alineación articular y distribución de cargas, lo que garantiza mayor seguridad en su uso.

Es importante señalar que, es esta primera fase, el proyecto se limita a abordar solo prótesis para extremidades traseras, dado que constituyen un área critica en la locomoción canina y llega a representar un escenario biomecánico donde los desafíos de soporte y una buena redistribución de cargas son particularmente más relevantes.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental aplicado, con el objetivo de diseñar, fabricar y validar las prótesis para perro que se hará mediante manufactura aditiva. La metodología se centra en criterios claros de evaluación como análisis de fuerzas, estabilidad, confort y adaptabilidad anatómica, garantizando que cumpla con las exigencias mecánicas y al mismo tiempo brinde seguridad y comodidad al paciente en su uso diario.

Uno de estos parámetros fundamentales (análisis de fuerza) proporciona una idea clara acerca de la distribución adecuada del peso mediante el modelo de cuerpo libre (Espín Lagos et al., 2023)

Dado que el perro tiene cuatro patas y se asume una distribución uniforme del peso corporal, cada extremidad soportara una fracción equitativa del peso total. (Sánchez Castillo, 2025)

La fuerza o carga soportada por cada extremidad del perro se determina mediante la ecuación (1):

$$W = m \cdot g \tag{1}$$

Donde: W es el peso en newtons, m es masa en kg y g es la aceleración gravitatoria (9.81 m/s^2)

Sustituyendo los valores por el peso real del perro (26.2 kg)

$$W = 26.2\ kg \cdot 9.81\ m/s^2 = 257.022\ N$$

Este resultado indica que el peso total del perro en Newtons es de 257.022 N. Con el valor del peso, se procedió a calcular el valor de cada extremidad fundamentado en principios físicos, específicamente en la primera Ley de Newton (también conocida como La ley de la Inercia). Aplicando la ecuación (2) :

$$F1 + F2 + F3 + F4 = \frac{257.022\ N}{4} \tag{2}$$

$$F1 + F2 + F3 + F4 = 64.25\ N$$

Se obtiene, que cada pata soporta aproximadamente 64.25 N de peso.

2.1 Selección de la muestra

Se tomó como base de estudio un caso específico: un paciente canino de raza Golden Retriever, de dos años de edad, con amputación en la extremidad derecha. Este ejemplar resultó un modelo adecuado para evaluar con mayor precisión la adaptabilidad y efectividad de la prótesis.
La selección del caso se basó en criterios clínicos que aseguran la seguridad y viabilidad del uso de prótesis, considerando factores como traumatismos, infecciones crónicas, lesiones neurológicas o malformaciones congénitas que afectan la movilidad.

2.2 Materiales

La selección de materiales es un factor determinante en el desarrollo de prótesis, ya que influye directamente en la resistencia, la comodidad y la funcionalidad del dispositivo. En este estudio se optó por emplear PLA y TPU, dos polímeros que, al complementarse, permiten alcanzar un equilibrio entre rigidez estructural y flexibilidad en las zonas críticas. El PLA se eligió por su ligereza, estabilidad dimensional y capacidad para proporcionar soporte firme a la estructura principal. En contraste, el TPU se destaca por su elasticidad, resistencia al impacto y capacidad de amortiguación, lo que lo convierte en la opción idónea para las áreas de contacto con el miembro residual y los puntos de flexión, para determinar si son materiales adecuados se presenta una comparación de las propiedades mencionadas a continuación:

En la Tabla 1 se presentan las propiedades más relevantes como dureza, módulo de tracción, límite elástico y resistencia al impacto que sustenta la elección realizada y evidencia su pertinencia para la fabricación de prótesis caninas mediante manufactura aditiva.

Tabla 1. Comparación entre TPU y PLA. Elaboración propia.

Propiedad	Thermoplastic Polyurethane (TPU)	Ácido Poliláctico (PLA)	PETG
Tipo de material	Elastómero termoplástico	Termoplástico Poliéster	Poliéster termoplástico
Dureza	95 Shore A en grados rígidos	80 – 85 Shore D (≈109 Rockwell R)	80°
Módulo de tracción	26 MPa (Inicial)	2.7 – 16 GPa	3000 MPa
Módulo elástico (Modulo de Young)	0.01 – 0.1 GPa (dependiendo de la dureza del TPU)	Entre 2.7 y 16 GPa (dependiendo de grado)	5.26 – 8.90 GPa
Resistencia	Hasta ~ 39 MPa	50 MPa	53 MPa
Alargamiento a la rotura	580 %	Bajo < 10 %	31%
Límite elástico	8.6 MPa	40 - 60 MPa	50 - 91 MPa
Punto de fusión	220°C	130-180 °C	210° - 235°
Resistencia al impacto	Buena resistencia a abrasión y desgaste	Relativamente baja / frágil	Fuerte resistencia
Resistencia química	Buena contra aceites, grasas, solventes moderados	Moderada; sensible a hidrólisis bajo condiciones húmedas o caliente	Excelente resistencia, ambientes acido y alcalinos
Comportamiento a baja temperatura	Mantiene flexibilidad incluso a bajas temperaturas	Mantiene la flexibilidad y elasticidad incluso por debajo de 0 °C	Puede volverse quebradizo
Densidad	1.22	1.24 g/cm³ (o 1.24 g/cc)	1.29 g/cm³
Absorción de humedad	0.18 % (24 h)	0.2 % (24 h)	0.12 %

2.3 Procedimiento

2.3.1. Obtención de datos anatómicos:

El procedimiento inicio con una observación detallada de su comportamiento y movilidad en su vida diaria, con el fin de identificar patrones en su marcha y posibles descompensaciones derivadas de la amputación, así como se muestra en la Figura 2.

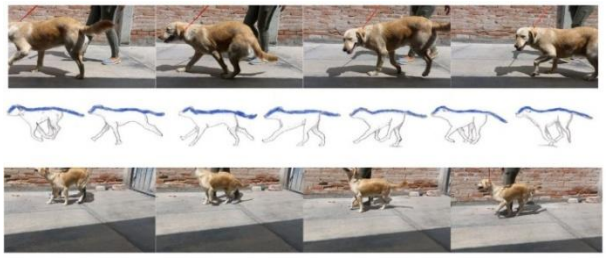


Figura 2. Patrón de marcha. Adaptado de Estudio cinético del perro por Escobar, 2017

Posteriormente, se recopilaron los antecedentes clínicos más relevantes, incluyendo la historia médica, esta información es fundamental, ya que permite corroborar si la prótesis cuenta con un punto de apoyo adecuado y si su uso no genera molestias o lesiones en el perro si la causa de la amputación permite la colocación de una prótesis y si es el momento adecuado de la colocación de esta. Esta información es fundamental para comprender el estado actual del paciente y planificar el diseño protésico de manera personalizada.

A partir de este análisis preliminar, se procedió a la toma de medidas anatómicas de la extremidad trasera sana como referencia. Se midió la longitud desde la articulación coxofemoral hasta la intersección del muñón, así como la circunferencia del muñón y del muslo. Estas mediciones son esenciales para garantizar un diseño protésico ajustado, seguro y funcional.

De acuerdo con los lineamientos reportados en literatura de ortopedia veterinaria, la obtención de medidas debe contemplar no solo dimensiones lineales, sino también perímetros de referencia y proporciones relativas entre los segmentos anatómicos, de modo que el diseño de la prótesis respete la biomecánica natural y evite puntos de presión excesiva. Este proceso metodológico asegura que el dispositivo cumpla con criterios de comodidad, estabilidad y alineación adecuada durante la marcha (Millis & Levine, 2014; Ferguson et al., 2016).

2.3.2. Diseño asistido por computadora (CAD):

Tabla 2. Medidas tomadas del canino.

Medidas	
Largo peroné - tarso	13 cm
Largo tarso – metatarso	11 cm
Largo de falanges (región plantar)	7 cm
Circunferencia del muñón	32 cm
Largo del muñón – fémur	16 cm

Con los datos anatómicos y clínicos obtenidos mostrados en la Tabla 2, se procedió a la construcción de la pieza detallada en SolidWorks, adoptando un enfoque paramétrico que permite adaptar el diseño a la morfología específica del paciente garantizando funcionalidad, confort y seguridad. El objetivo central fue desarrollar un diseño protésico que respetara la biomecánica natural del Golden Retriever y facilitara un ciclo de marcha lo más cercano posible al comportamiento fisiológico del animal.

La pieza fue modelada incluyendo dimensiones lineales como la longitud desde la articulación coxofemoral hasta la intersección del muñón, así como circunferencias del muslo y del muñón, tal como se muestra en la Figura 3. Además, se consideraron proporciones relativas entre los segmentos anatómicos para asegurar que la prótesis respetara la alineación y el equilibrio natural del paciente (Millis & Levine, 2014; Ferguson et al., 2016).

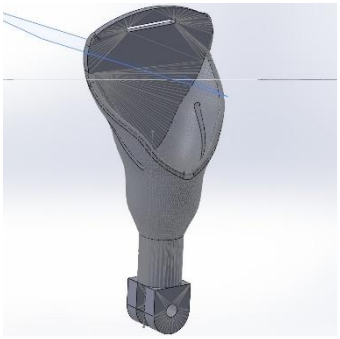


Figura 3. Soporte superior. Elaboración propia

En este primer diseño se propuso un modelo estándar, tomando como referencia la geometría de la base que se ajusta al muñón del paciente. Esta base fue diseñada para garantizar un encaje firme y seguro, distribuyendo uniformemente las cargas durante la marcha y minimizando puntos de presión que pudieran causar incomodidades y/o lesiones. Además, se consideraron las proporciones anatómicas de la extremidad remanente para asegurar que la prótesis mantuviera una alineación adecuada y que facilite un movimiento natural del miembro.

Para el diseño de la estructura que simula la región plantar del perro se eligió un modelo que combinara estabilidad, buen agarre y adaptabilidad al ciclo de marcha del paciente. Esto se garantiza mediante la correcta unión de todas las piezas de la prótesis. Se empleó un diseño estándar en forma de medialuna, ya que optimiza la distribución de cargas durante el apoyo.

Considerando la estructura anatómica y la movilidad de los perros, se determinó que una base en medialuna resultaba más adecuada que una plana. La superficie inferior incorpora un patrón de semicírculos que funciona como antideslizante, mejorando la tracción y la seguridad durante la marcha, como se muestra en la Figura 4.

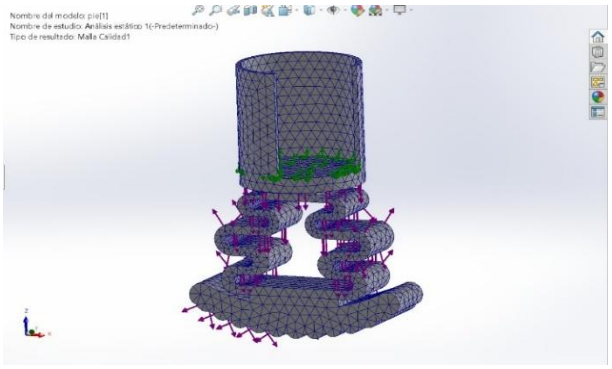


Figura 4. Soporte inferior. Elaboración propia

Además, la geometría de las conexiones permite una inclinación controlada, proporcionando un impulso natural al iniciar el paso y una amortiguación eficiente al finalizar la fase de apoyo, favoreciendo así una marcha más fluida y cómoda.

La base y el soporte están unidos mediante un tubo estructural, el cual proporciona rigidez, estabilidad y soporte adicional a la prótesis, asegurando que los componentes mantengan su alineación correcta durante la marcha y que la transmisión de fuerzas sea eficiente y segura, como se muestra en la figura 5.

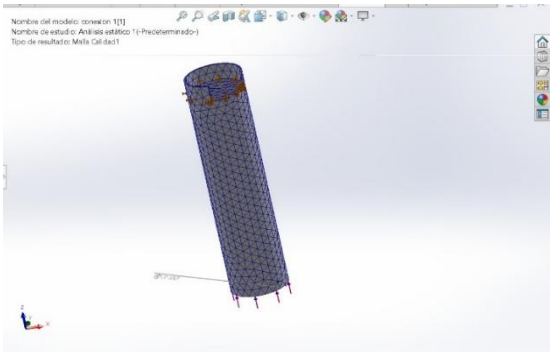


Figura 5. Pieza del conector. Elaboración propia.

2.3.3. Prototipado aditivo y fabricación:

Las piezas de la prótesis fueron fabricadas mediante tecnología de impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling), aplicando PLA para estructuras rígidas proporcionando soporte y resistencia mientras que TPU se empleó en zonas que requieren flexibilidad y amortiguación, garantizando confort y seguridad durante el uso.

Una vez terminado cada uno de los diseños, se exportó a Ultimaker Cura, software encargado de definir parámetros críticos como tipo de relleno, densidad, velocidad de impresión y orientación de capas, asegurado que la pieza final cumpliera con los estándares de precisión y funcionalidad.

Durante el proceso, se implementó un enfoque de iteración rápida, realizando ajustes sucesivos en los diseños de acuerdo con las evaluaciones veterinarias y pruebas de ajuste físico en los pacientes (Figura 6), lo que permitió optimizar el rendimiento de cada prótesis y su adaptación anatómica individual.

Figura 6. Impresión de prototipo. Elaboración propia.

2.3.4. Evaluación y validación veterinaria:

El diseño y la morfología de cada prótesis fueron revisados bajo la orientación de un veterinario, quien evaluó aspectos como la alineación articular, la distribución del peso y la ergonomía general de la prótesis. Esta supervisión clínica resultó fundamental para asegurar que la propuesta inicial no solo respondiera a criterios técnicos, sino también a necesidades anatómicas del paciente.

Gracias a esta retroalimentación se realizaron ajustes preliminares que ayudaron a la adaptación de la prótesis al muñón y mejoraron el confort general del animal, facilitando un proceso de colocación más seguro y estable.

Si bien no se efectuaron análisis formales de locomoción o balance, la valoración veterinaria aportó criterios esenciales que permitieron garantizar el respeto por los principios básicos de la biomecánica, promoviendo una movilidad más natural y favoreciendo la postura fisiológica del perro durante las pruebas iniciales.

2.4 Justificación metodológica

La metodología implementada en este estudio integra el uso de materiales compatibles, el diseño digital de alta precisión y la fabricación aditiva, lo que garantiza la producción de prótesis reproducibles, escalables y económicamente accesibles.

La combinación de PLA y TPU ofrece un equilibrio óptimo entre rigidez estructural, resistencia mecánica y confort, asegurando que cada dispositivo proporcione el soporte necesario al mismo tiempo que se adapta de manera segura a los movimientos naturales del perro.

De forma complementaria, el uso de CAD (SolidWorks) posibilita el diseño de prótesis con precisión anatómica individualizada, incorporando criterios de ergonomía y distribución de cargas con el fin de replicar de manera eficiente la biomecánica de la extremidad.

Esta integración de materiales, modelado digital y supervisión veterinaria constituye un enfoque práctico que no solo responde a las necesidades clínicas inmediatas, sino que también establece un marco técnico replicable y adaptable a otras especies. Además, resulta aplicable en entornos veterinarios con recursos limitados, promoviendo el desarrollo de soluciones personalizadas, funcionales y de bajo costo para pacientes caninos con amputaciones.

3. RESULTADOS

Durante la prueba inicial de colocación, el perro mantuvo la prótesis en posición y realizó desplazamientos cortos dentro de un espacio controlado. Se registraron ajustes posturales leves y cierta rigidez en la marcha, aspectos que suelen presentarse de manera normal en la fase de adaptación inicial al uso de un dispositivo protésico.

El ajuste del muñón se consideró adecuado, sin evidencia de lesiones cutáneas, irritación o signos de incomodidad durante la sesión. La primera prueba tuvo como propósito principal verificar la estabilidad mecánica de la prótesis y la tolerancia del paciente a su uso.
Asimismo, se observó que el tiempo de colocación fue corto y no requirió maniobras adicionales, lo que indico un correcto diseño con las dimensiones.

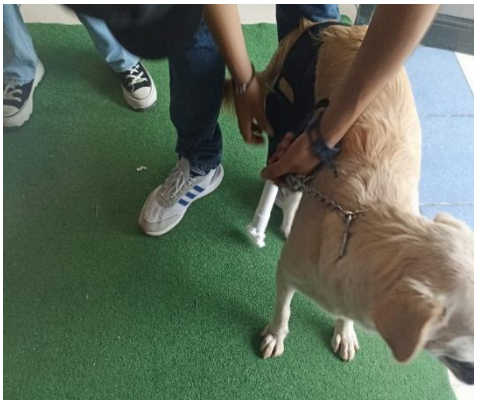


Figura 7. Colocación de Prótesis

4. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la factibilidad de la fabricación de prótesis de extremidades traseras caninas mediante impresión 3D FDM, haciendo uso de materiales aditivos (PLA y TPU) con diseño en CAD y orientación veterinaria, lo que hace que los resultados preliminares den evidencia que la prótesis puede adaptarse de forma estable y segura, aunque se trató de una prueba única y de carácter exploratorio, los avances alcanzados sientan bases para continuación con evaluaciones prolongadas que incluyan análisis de marcha, distribución de cargas y durabilidad de los materiales en situaciones reales.

Uno de los principales aportes de este trabajo es la creación de un modelo de prótesis personalizable, tomando en cuenta la variedad de razas de caninos. A futuro, lo más prometedor es profundizar en la optimización del diseño biomecánico, explorar materiales alternativos más flexibles y establecer protocolos de validación que consoliden la evidencia científica en esta área.

REFERENCIAS

Arauz, P.G. et al. (2021). New technologies applied to canine limb prostheses: a review, Veterinary world, 14(10), pp. 2793–2802. Disponible en: https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.2793-2802.

Collins, S.H. and Ruina, A. (2006). A bipedal walking robot with efficient and human-like gait, in Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE.

Escobar, J. (2020) Desarrollo de prótesis ortopédicas personalizadas para caninos mediante impresión 3D. Unpublished.

Espin, L. S. et al. (2023). Diseño y construcción de una prótesis de pata de can con amputación de extremidad delantera mediante impresión 3D. Disponible en: https://doi.org/10.37135/ns.01.12.09.

Ferguson, J. (2016). Breast prosthesis infection and pets: A case report. Journal of Veterinary Science & Technology, 7(3).

Jansen, T.(2007). The Jansen linkage. Journal of Mechanisms and Robotics, 1(1), p. 1.

Mendaza-Decal, R. (2023). Orthotics and prosthetics by 3D-printing: Accelerating its application in veterinary medicine. Frontiers in Veterinary Science, 10.

Millis, D.L. and Ciuperca, I.A. (2015). Evidence for canine rehabilitation and physical therapy. The Veterinary clinics of North America. Small animal practice, 45(1), pp. 1–27. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2014.09.001.

Ranakoti, L. et al. (2022). Critical review on polylactic acid: Properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites, Materials, 15(12), p. 4312. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ma15124312.

Rodriguez, A. (2020). El Módulo de Young: Qué es y Cómo se Calcula," Servosis, 29 June. Disponible en: https://www.servosis.com/el-modulo-de-young-o-modulo-de-elasticidad-longitudinal

Rodríguez, O. (2024). Dynamic and postural changes in forelimb amputee dogs. Animals, 14(13), p. 1960

Sanchez C.M. (2025) Diseño y simulación de una prótesis funcional para la pata delantera de perros con discapacidad motora

Santorini, T. (2021). A new approach to treatment selection in dogs with cruciate ligament rupture: Patient-specific treatment recommendations. Journal of Veterinary Surgery, 50(5), pp. 1001–1010.

Souza, M.M.N. and Antonioli, M.C. (2025). 3D exoprosthesis in socket model for dog with amputated pelvic limb: Case report. BMC Veterinary Research, 21(1).

Wendland, T.M., Seguin, B. and Duerr, F.M. (2023) Prospective evaluation of canine partial limb amputation with socket prostheses. Veterinary medicine and science, 9(4), pp. 1521–1533. Disponible en: https://doi.org/10.1002/vms3.1146.

What is PLA? (everything you need to know) (S.f.) TWI Global. Disponible en: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla

A Low-Power Band-Pass Filter suitable for ECG/EMG signals

Rangel-Jimenez, Orlando* **Fernandez-Martinez, Joselyn M.****
Cisneros-Sinencio, Luis F.* **Diaz-Sanchez, Alejandro 4** **

* *Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Primero de Mayo 1610, Cd. Madero, Tamaulipas, 89460. (e-mail: L23070144@cdmadero.tecnm.mx, fortino.cs@cdmadero.tecnm.mx).*
** *Instituto Nacional de Astrofisica, Optica y Electronica, Luis Enrique Erro No. 1, Tonantzintla, Puebla 72840. (e-mail: joselyn.fernandez@inaoe.mx, adiazsan@inaoe.mx)*

Abstract: This work reports the design and validation of an OTA-based bandpass filter optimized for ultra-low-power biomedical applications. The filter is tuned to the spectral requirements of ECG (0.1–100 Hz) and EMG (20–500 Hz) signals, ensuring effective noise suppression while preserving waveform morphology. To achieve the required sub-Hz cutoff frequencies without excessive area penalty, pseudo-resistors based on off-state MOS transistors were employed, providing G-Ohm level resistances with reduced harmonic distortion. A current- mirror OTA architecture was selected to maximize output swing under a 1 V supply, while maintaining reliable operation in the subthreshold region. The circuit was implemented in the open-source SkyWater 130 nm PDK and simulated in LTspice. The design achieves a maximum gain of 12 dB and a total power consumption of only 1.62 μW. These results confirm the suitability of the proposed approach for integration into wearable biomedical front-ends, where ultra-low-frequency operation and stringent power constraints are critical.

Keywords: Band-pass Filter, Low-Voltage, Pseudo-resistor, Tunable

1. INTRODUCTION

Biopotential monitoring represents a cornerstone of mod- ern healthcare diagnostics and human-machine interfaces, with applications ranging from portable monitors and smart patches for arrhythmia detection Zheng et al. (2022) to the control of advanced neuroprosthetics Guerrero et al. (2024). This expanding application space has re-lentlessly pushed front-end integrated circuits toward ever-lower power consumption, higher integration density, and greater reconfigurability Lee and Je (2023). Among these, surface electromyography (EMG) and electrocardiography (ECG) are especially demanding because their clinically useful spectra lie at low frequency, have narrow amplitude, and are easily corrupted by motion artifacts, baseline drift, and power-line interference. Typical ECG content spans roughly 0.05–100/150 Hz depending on the diagnostic task and applicable standards, while EMG extends from 5–10 Hz up to 400–500 Hz, with most energy between 50–150 Hz Choi et al. (2023) as shown in Fig. 1. Recent reviews emphasize that robust artifact suppression in EMG/ECG front ends requires adaptive band selection (e.g. motion-artifact suppression < 20–30 Hz, notch filtering at 50/60 Hz, and anti-aliasing prior to digitization) Lee and Je (2023).

Most biopotential front-end circuits suffer from degraded performance due to flicker noise within the bio-signal band, device mismatch and offset from process variation, skin-to-electrode offsets, and motion-induced disturbances from electrode and cable movement. Biopotential signals such as EEG, and ECG contain essential low-frequency com-ponents (< 300 Hz) which overlap with the flicker noise region Wu (2025).

ENG signals requires the consideration of other electrical activity that exists in the human body as presented in Fig. 1. The electrical stimulation of muscles produces electrical fields (i.e. EMG noise) at the site of recording electrodes Chowdhury et al. (2013). Additionally, the signal can be easily corrupted by capacitively or inductively coupled electrical noise such as the 50-60 Hz power line interfer-ence. Low frequency flicker noise and thermal noise can also corrupt the signal. The ENG signals are in the 1-5 mV range, where the EMG signals in 1-10 mV range. The spectra of both signals are close together, making frequency-based filtering challenging.

To satisfy the power and area constraints of wearable and

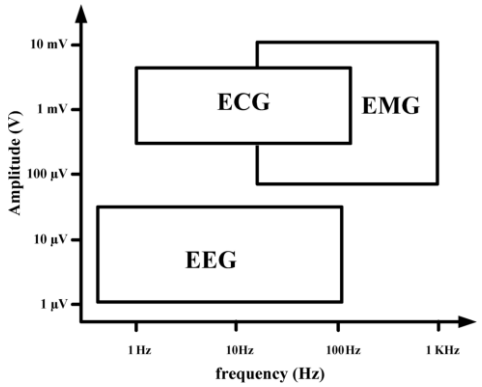


Fig. 1. Signal Amplitude [μV] against Frequency [Hz] of biosignals ExG.

implantable biosignal front-ends, recent research has focused on tunable low-frequency filters with supply voltages below 1 V and sub-μW power budgets. The most common architectures include active-RC, G_m–C/OTA-C, and digitally assisted analog filters. Among these, G_m–C/OTA-C topologies remain the dominant choice due to their intrinsic capability for continuous frequency tuning through bias-current control and their compatibility with low-voltage operation. For instance, Yin et al. (2024) proposed a transconductance-stable OTA and a corresponding OTA-C low-pass filter achieving tunable cutoff frequencies suitable for ECG acquisition under 0.6 V supply and ¡ 1 µW power. Similarly, Rezaei and Salem (2025) reported a fourth-order Gm-C filter operating at 0.5 V with wide bandwidth reconfigurability, demonstrating that high-order filtering can be achieved without compromising linearity.

Subthreshold and bulk-driven OTAs have also been employed to drastically reduce static power consumption. Bano et al. (2019) demonstrated biquad cells operating in the subthreshold regime with nanowatt-level power suitable for portable ECG front-ends, while Hori et al. (2004) proposed an adaptive DC biasing technique that maintains transconductance linearity under ultra-low sup- ply voltages. Other works have explored unconventional architectures such as source-follower-based filters and MI-OTA designs Srinivasagan (2025); Kumngern et al. (2025), offering improved energy efficiency and integration density. Beyond analog implementations, digitally assisted filtering has emerged as an attractive compromise between preci- sion and power efficiency. By employing digital calibration and current DACs to control transconductance values, filters such as those presented by Elamien and Mahmoud (2018) achieve tunable bandwidths from 100 Hz up to several MHz with stable characteristics over process and temperature variations. Hybrid analog–digital approaches are particularly relevant for EMG and ECG systems, as they enable real-time adaptability while maintaining ultra- low average power. More recently, Jendernalik and Jakusz (2024) have demonstrated biquadratic and universal Gm- C filters capable of programmable responses with power levels ranging from tens of nanowatts to a few hundred microwatts, reaffirming that G_m-C/OTA-C architectures remain the most flexible and energy-efficient option for modern biomedical front-ends.

In this paper, we present the design of a low-power OTA-driven bandpass filter for ECG and EMG signal acquisition. Section II introduces the methodology approach and the mathematical foundations employed to validate the filter behavior. Section III describes the proposed circuit topologies, including the pseudo-resistor implementation and the current-mirror OTA architecture and the characterization results, highlighting the filter responses, harmonic distortion analysis, and power consumption metrics obtained from schematic simulations. Finally, Section IV concludes with a summary of the main contributions and their relevance to biomedical applications.

2. METHODOLOGY

In this work, the first step involved the macromodeling of an operational transconductance amplifier (OTA), represented as a voltage-controlled current source. The filter was designed to match the spectral characteristics of biomedical signals, targeting bandwidths consistent with EMG (20–500 Hz) and ECG (0.1–100 Hz). To achieve these bandwidths, the corresponding resistance and capacitance values were obtained through simulation, as summarized in Table 1.

Table 1. Ideal values of filter components

Component	ECG-Filter	EMG-Filter
R_1	50 GΩ	150 MΩ
R_2	350 MΩ	3.3 GΩ
C_1	5 pF	2 pF
C_2	500 fF	100 fF

2.1 Filter Topology

Figure 2 illustrates the standard-cell filter topology proposed in Diaz-Sanchez et al. (2024), in which the overall response is defined by the interconnection of the input terminals, denoted as $v_{ip,n1}$ and $v_{ip,n2}$.

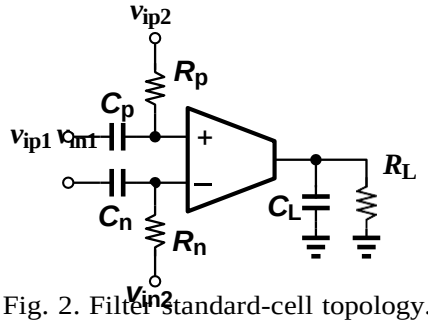


Fig. 2. Filter standard-cell topology.

Depending on the chosen configuration, the circuit can realize distinct transfer characteristics by altering the pole–zero distribution, thereby enabling operation either as a band-pass, low-pass, all-pass element within the same structural design. This reconfigurability highlights the versatility of the topology, while the generalized transfer function corresponding to the architecture in Fig. 2 is formally described in Eq. 1.

$$v_O(s) = g_m R_L \cdot \frac{\frac{1}{C_L R_L}}{s + \frac{1}{C_L R_L}} \cdot (v_p - v_n) \qquad (1)$$

The low-pass/high-pass (band-pass) configuration is obtained by grounding the v_{ip1} and v_{in2} ports in Fig. 2. Under this condition, the circuit exhibits frequency-selective

behavior where low-frequency and high-frequency corners are defined by the external resistance and capacitor values (denoted by R_p,R_n,C_p and C_n in Fig. 2). The resulting output voltage $v_O(s)$ is governed by the transfer function expressed in Eq. 2, being 3 and 4 the corners of the filter.

$$v_O(s) = A_v(s)\,[\kappa_1 \cdot v_{ip2}(s) - \kappa_2 \cdot v_{in1}(s)] \quad (2)$$

$$\kappa_1 = \frac{\frac{1}{C_p R_p}}{s + \frac{1}{C_p R_p}} \quad (3)$$

$$\kappa_2 = \frac{s}{s + \frac{1}{C_n R_n}} \quad (4)$$

This configuration does not realize a true differential-input filter; instead, it produces two independent single-ended responses. When the inputs are shorted together, these responses combine into a single-ended excitation, thereby restricting differential-mode operation while still preserving the desired frequency-selective characteristics.

2.2 Pseudo-resistor Proposal

Achieving the very low cutoff frequencies required in this work demands resistance values that are impractically large in CMOS technology, leading to increased device mismatch and excessive area consumption. To overcome these limitations, pseudo-resistors implemented with off-state MOS transistors are adopted, offering effective resistance values several orders of magnitude higher than those attainable with passive devices. In particular, the topology reported in Guglielmi et al. (2020) is employed. A single pseudo-resistor configuration is used as a baseline, while two devices connected in series further extend the resistance range with low Total Harmonic Distortion (THD). In both cases, the effective resistance can be tuned by adjusting the bias voltage V_{ctrl}, thereby providing a flexible mechanism to set the desired cutoff frequency.

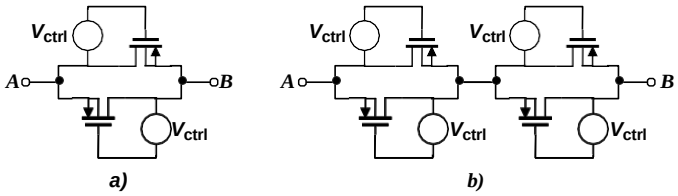


Fig. 3. Pseudo-resistor a) Single cell b) Two-series.

Under the pseudo-resistor configuration shown in Fig. 3a, the equivalent resistance can be derived from the sub-threshold current expression of the MOS transistor, given in Eq. 5. In this equation, n denotes the subthreshold slope factor, $C'ox$ is the gate-oxide capacitance per unit area, μ is the carrier mobility, $V\,th = kT/q$ represents the thermal voltage, and (W/L) is the transistor aspect ratio. Accordingly, the equivalent resistance of the pseudo- resistor across terminals A–B, denoted as V_{AB}, for the condition $V_{AB} = 0$ V is expressed in Eq. 6, according to Guglielmi et al. (2020).

$$I_{SD} = I_{SD0} \cdot \exp\left(\frac{V_{SG}}{nV_{th}}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{V_{SD}}{V_{th}}\right)\right) \quad (5)$$

$$r_{eq0}\big|_{V_{AB}=0} = \left(\frac{\partial I_{SD}}{\partial V_{SD}}\bigg|_{V_{SD},V_{SG}=0}\right)^{-1} = \frac{V_{th}}{I_{SD0}} \quad (6)$$

2.3 Current-Mirror OTA

Telescopic and folded-cascode OTAs are commonly employed to increase the output resistance (r_{out}), thereby achieving high low-frequency gain (A_o). However, a key tradeoff of these architectures is the limited output swing and the reduction in gain–bandwidth product (ω_{GB}), both constrained by the cascode output stages. Zheng et al. (2022).

In contrast, the current-mirror OTA offers a wider output swing compared to its cascode counterparts, which represents one of its primary advantages. Since only two transistors are connected to the output node, both can be reliably biased in saturation. Under this condition, the maximum output voltage is limited to $V_{DD} - V_{D,SAT}$, while the minimum output voltage is delimited by $V_{D,SAT}$.

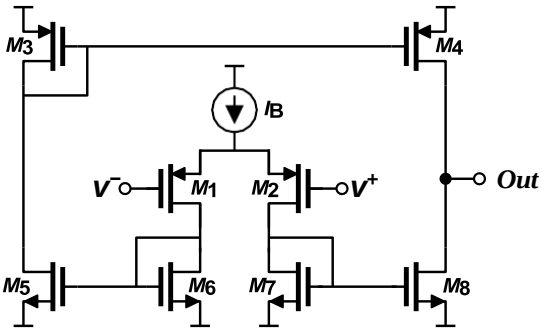


Fig. 4. Current mirror OTA topology.

The open-loop gain of the OTA is determined by the product of its input transconductance and the output resistance, which is primarily defined by the transistors M_4 and M_8 in Fig. 4. Accordingly, the overall gain can be expressed as shown in Eq. 7.

$$A_O = g_m r_{out} = \frac{g_m}{g_{ds4} + g_{ds8}} \quad (7)$$

3. RESULTS

The design targets low-power biomedical applications; therefore, the supply voltage was limited to 1 V and the total power consumption constrained to less than 2 μW. The implementation was carried out in the open-source SkyWater 130 nm PDK, and simulations were performed using LTSpice. The output data were exported in .txt format and subsequently processed in MATLAB to enhance visualization and analysis.

To ensure operation of the transistors in the subthreshold region, high-voltage (HV) devices were selected, as they exhibit a higher threshold voltage (V_{th}) compared to nominal devices. The design parameters and device dimensions are summarized in Table 2.

Table 2. Aspect ratios of filter topology

Transistor	W	L
$M_{1,2}$	1.5 μm	0.35 μm
$M_{6,7}$	10 μm	0.35 μm
$M_{5,8}$	40 μm	0.35 μm
$M_{3,4}$	20 μm	0.35 μm
M_{PR}	1 μm	15 μm

3.1 Macromodeling

To validate the proposed approach, a dataset obtained from the PhysioNet repositories was processed under transient simulation. The OTA-based bandpass configuration demonstrated effective attenuation of out-of-band noise while preserving the morphological integrity of both EMG and ECG waveforms Zheng et al. (2022). Figure 5 shows the transient response of the ECG signal after filtering with the macromodel, using the component values listed in Table 1 under ideal conditions.

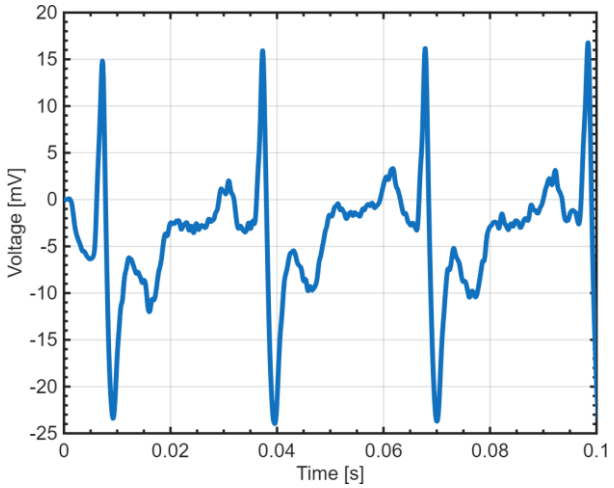


Fig. 5. Transient response of the OTA-based filter macromodel for an ECG noisy input.

3.2 PR Characterization

Due to the inherent nonlinear behavior of pseudo-resistors, their characterization was carried out in terms of the harmonic distortion introduced across terminals A–B, as shown in Fig. 3, as well as the control voltage that governs their effective resistance. By sweeping different input amplitudes, two comparative metrics were extracted: the equivalent resistance (defined at the operating point where the current reaches its minimum) and the distortion of the output signal.

For the case shown in Fig. 6, the curves illustrate the THD characterization for different input amplitudes, along with the extracted resistance values as a function of V_{ctrl} for topology (b) in Fig. 3. It can be observed that this configuration achieves a higher resistance order while exhibiting a considerable reduction in THD compared to the first topology.

Finally, based on the characterization of the topology that provides the lowest distortion, the pseudo-resistors were further evaluated through their *I–V* characteristics, as shown in Fig. 8. For the EMG filter, pseudo-resistor values of 3.3 GΩ and 150 MΩ were obtained with control voltages of 0.6 V and 0.75 V, respectively. In contrast, for the ECG filter, resistance values of 350 MΩ and 50 GΩ were achieved with control voltages of 0.7 V and 0.5 V, respectively.

3.3 Filter Response

The final filter response for each selected frequency band is shown in Fig. 9. The gain curves cover the bandwidths

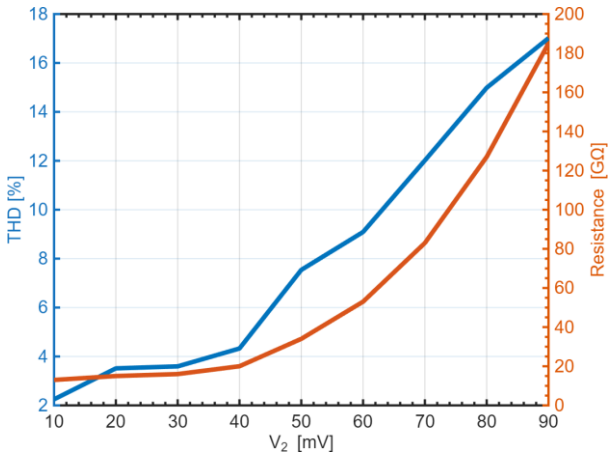


Fig. 6. THD and output resistance characterization of the single-cell pseudo-resistor topology as a function of V_{ctrl} and input amplitude.

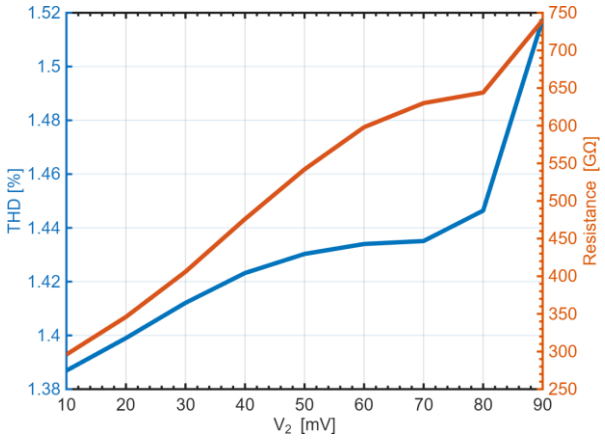


Fig. 7. THD and output resistance characterization of the two-series pseudo-resistor topology as a function of V_{ctrl} and input amplitude.

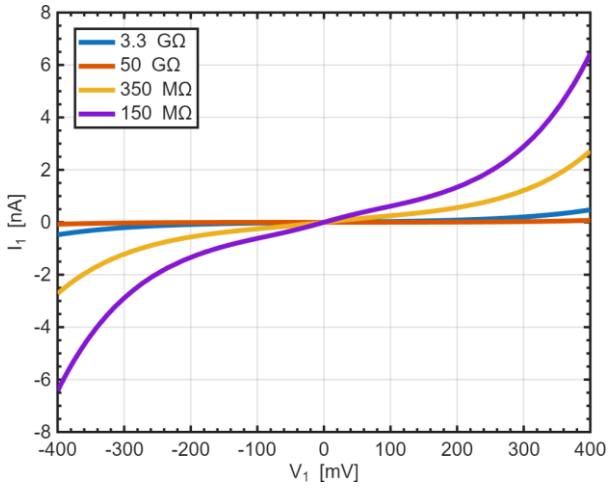


Fig. 8. *I–V* transfer characteristics of pseudo-resistors tuned for ECG and EMG filter cutoff frequencies.

previously defined for ECG and EMG applications, confirming proper band allocation. Within the passband, a maximum gain of 12 dB was measured, which is consistent with the low current consumption constraints of the design. The overall implementation achieves the required frequency selectivity with a total power consumption of 1.62 μW.

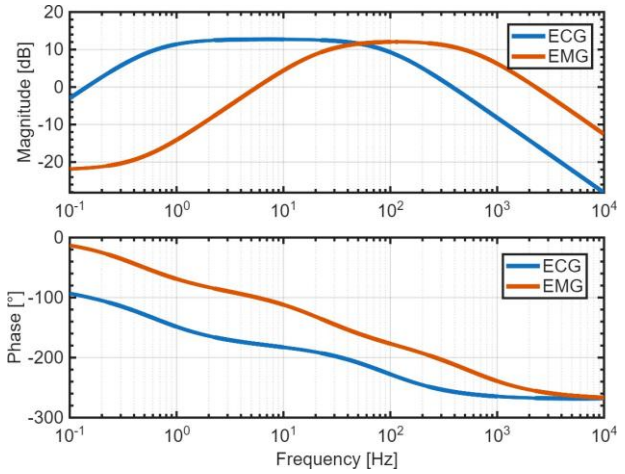


Fig. 9. Bode plots for ECG and EMG bandwidths with measured passband gain.

4. CONCLUSION

This work presented the design and macromodeling of an OTA-based bandpass filter intended for low-power biomedical applications. The use of pseudo-resistors implemented with off-state MOS devices enabled the realization of low-cutoff frequencies with minimal area overhead while maintaining low THD. A current-mirror OTA architecture was adopted to achieve a wider output swing at 1 V supply and ultra-low power consumption. The design was vali- dated through transient simulations using datasets from PhysioNet, demonstrating effective noise attenuation while preserving the morphological features of ECG and EMG signals. The proposed approach achieves a total power consumption of 1.62 μW in SkyWater 130 nm technology, confirming its suitability for biomedical front-ends operat- ing in ultra-low-frequency bands.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the Scientific Research Summer Program at INAOE (VICI, by its acronym in Spanish) for enabling the collaboration and development of this work and Joselyn M. Fernandez-Martinez thanks SECIHTI- Mexico for the CVU 1188692 scholarship to pursue a PhD.

REFERENCES

Bano, S., Narejo, G.B., and Ali, S.M.U. (2019). Nanopower sub-threshold biquadratic cells and its application to portable ECG system. *Int. J. Electron. Commun.*, 107, 57–69.

Choi, J., Kweon, S.J., and Jeon, H. (2023). Single-stage CMOS operational transconductance amplifiers (OTAs): A design tutorial. *Electronics (Basel)*, 12(18), 3833.

Chowdhury, R.H., Reaz, M.B.I., Ali, M.A.B.M., Bakar, A.A.A., Chellappan, K., and Chang, T.G. (2013). Surface electromyography signal processing and classification techniques. *Sensors (Basel)*, 13(9), 12431–12466.

Diaz-Sanchez, A., Zamora-Mejia, G., Rocha-Perez, J.M., Vazquez-Gonzalez, J.L., and Zapata-Rodriguez, U.G. (2024). A reconfigurable-band analog filter standard- cell based on differential/single input signaling. *IEEE Access*, 12, 13586–13600.

Elamien, M.B. and Mahmoud, S.A. (2018). An 114 hz–12 MHz digitally controlled low-pass filter for biomedical and wireless applications. *IET Circuits Devices Syst.*, 12(5), 606–614.

Guerrero, F.N., Catacora, V.A., Grasso, A.D., and Palumbo, G. (2024). Multi-electrode EMG spatial-filter implementation based on current conveyors. *Electronics (Basel)*, 13(9), 1735.

Guglielmi, E., Toso, F., Zanetto, F., Sciortino, G., Mesri, A., Sampietro, M., and Ferrari, G. (2020). High-Value tunable Pseudo-Resistors design. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 55(8), 2094–2105.

Hori, S., Maeda, T., Matsuno, N., and Hida, H. (2004). Low-power widely tunable Gm-C filter with an adaptive DC-blocking, triode-biased MOSFET transconductor. In *Proceedings of the 30th European Solid-State Circuits Conference*. IEEE.

Jendernalik, W. and Jakusz, J. (2024). Fully tunable analog biquadratic filter for low-power auditory signal processing in CMOS technologies. *Electronics (Basel)*, 13(16), 3132.

Kumngern, M., Khateb, F., Kulej, T., and Lerkvaranyu, S. (2025). 0.5-v high-order universal filter for bio-signal processing applications. *Appl. Sci. (Basel)*, 15(7), 3969.

Lee, T. and Je, M. (2023). Trend investigation of biopotential recording front-end channels for invasive and non-invasive applications.

Rezaei, F. and Salem, L.G. (2025). A fourth-order tunable bandwidth g_m -c filter for ECG detection achieving 7.9 dBV IIP3 under a 0.5 V supply. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.*, 33(9), 2438–2448.

Srinivasagan, R. (2025). Advanced low-power filter architecture for biomedical signals with adaptive tuning. *PLoS One*, 20(1), e0311768.

Wu, Y. (2025). Low-noise electrocardiogram analog front-end. In *Advances in Engineering Research*, Advances in engineering research, 1004–1011. Atlantis Press International BV, Dordrecht.

Yin, Y., Zhang, X., Feng, Z., Qi, H., Lu, H., He, J., Jin, C., and Luo, Y. (2024). An ultra-low-voltage transconductance stable and enhanced OTA for ECG signal processing. *Micromachines (Basel)*, 15(9), 1108.

Zheng, J., Guo, H., and Chu, H. (2022). A large scale 12-lead electrocardiogram database for arrhythmia study.

Classification of Emg Signals Using Neural Networks in the Activation of the Biceps Brachii Muscle

Herrera Ramírez, J. Misraim *, Hernández Gonzaga, Brenda *, Celis Petla, Daniel*, Namigtle Jiménez Alfredo**

** Instituto Tecnológico de Tehuacán, 75770.*
(e-mail: L21360196@tehuacan.tecnm.mx , L21360195@tehuacan.tecnm.mx, L21360173@tehuacan.tecnm.mx).

*** Instituto Tecnológico de Tehuacán. 75770*

(e-mail: alfredo.nj@tehuacan.tecnm.mx)

Abstract: This project focuses on the analysis and classification of electromyographic (EMG) signals from the biceps brachii using artificial neural networks (ANNs). Electromyography is a technique that records the electrical activity produced by muscles during contraction, which is highly valuable for studying muscle fatigue, detecting injuries, and understanding activation patterns. Its applications are essential in fields such as rehabilitation, sports medicine, and biomedical device development. The methodology consisted of two main stages. In the offline phase, 17 features were extracted from EMG signals in both the time and frequency domains, which were then used to train the neural network. In the online phase, the trained model was implemented in hardware using an Arduino Uno and a low-cost EMG sensor, enabling real-time movement classification. The signals were acquired through surface electrodes placed on a healthy subject, recording five types of biceps movements: initiation, lifting, release, holding, and termination. The results demonstrated that the system achieved 100% accuracy in classifying muscular movements, validating the efficiency of the proposed model. These findings highlight the potential of combining accessible sensors with artificial intelligence for the analysis and characterization of muscle activity. Furthermore, the developed system represents a technological foundation that may be applied in future research related to rehabilitation and biomedical device control.
Keywords: Neural networks, EMG, signal classifier, biceps brachii

1. INTRODUCCIÓN

La electromiografía se ha convertido en una parte esencial para el estudio de sistemas neuromuscular, pues permite registrar la actividad eléctrica que es producida durante la contracción muscular mediante un movimiento o una actividad (Marri, K., & Swaminathan, R. 2015). Este tipo de señal proporciona procesos fisiológicos relacionados con la fibra muscular y ayuda a determinar la fatiga de dicha zona. Por este motivo el análisis de señales EMG resulta de gran utilidad en diferentes áreas, tales como la rehabilitación, el deporte y el desarrollo de dispositivos biomédicos (Hiraiwa, A., Shimohara, K. and Tokunaga, Y. 1989).

Dentro de los músculos más estudiados es el bíceps braquial pues este musculo es clave de los movimientos como son la flexión, extensión del codo, actividades que son fundamentales en la vida cotidiana del ser humano (Azhiri, R., Esma eili, M. a nd Noura ni, M. 2021). Este musculo ayuda a comprender a como varia la señal EMG en el bíceps en diferentes condiciones, con esto podemos llevar a identificar roturas del músculo, lesiones y la fatiga que es una los principales factores cuando realizamos alguna actividad bajo constantes movimiento según Quesada, L., Verdel, D., Bruneau, O., Berret, B., Amorim, M.A. & Vignais, N. (2025). Sin embargo, a pesar de los avances en el uso de EMG en aplicaciones biomédicas y deportivas, existe una problemática significativa: actualmente no se dispone de clasificadores de señales que sean accesibles y fáciles de utilizar por fisioterapeutas u otros especialistas, que permitan identificar de manera directa y confiable la fatiga muscular en el bíceps braquial (Chowdhury, R.H., Reaz, M.B.I., Ali, M.A.B.S., Bakar, A.A.A., Chellappan, K. and Chang, T.G. 2013).

La clasificación de las señales electromiografías (EMG) es un paso clave en la comprensión de la actividad muscular, ya que permite diferenciar patrones de movimiento, grados de fatiga o trastornos neuromusculares según dice Jiang, X., Merhi, L.K., Xiao, Z.G. and Menon, C. (2017). Estas, de diversas formas complejas y no estacionarias, se obtienen a través de electrodos de superficie o intramusculares y requieren de métodos de procesamiento avanzados para filtrar la información (Sadikoglu, F., Kavalcioglu, C. & Dagman, B. 2017).

La no presencia de dichos sistemas limita el diagnóstico temprano de lesiones y la prevención de daños mayores durante rehabilitación o entrenamiento (Izaurieta, F. and Saavedra, C. 2000). Debido a la elevada complejidad, al ruido y a ser altamente variable, es necesario procesar y clasificar la señal electromiografía con el fin de que sea posible

interpretarla de forma más sencilla y precisa (Phinyomark, A., Phukpattaranont, P., & Limsakul, C. 2012).

Existen diferentes formas de clasificar señales, por un lado, existen los métodos en el dominio temporal y frecuencia, en el que la Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite identificar frecuencias predominantes en el EMG (Lia o, S.H. 2005) y donde indicadores como el valor cuadrático medio o la media de frecuencia permiten caracterizar actividad muscular o la fatiga vista en Akin, M. (2002).

En el otro lado, existen los métodos en el dominio tiempo-frecuencia como la Transformada Wavelet, que permite descomponer la señal en diferentes escalas lo cual permite la identificación de patrones transitorios establecidos o del movimiento (Karim, S.A.A., Kamarudin, M.H., Karim, B.A., Hasan, M.K. a nd Sula ima n, J. 2011).

Las técnicas más utilizadas engloban los clasificadores lineales a partir del Análisis Discriminante Lineal (LDA), y Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), que son clasificadores que destacan por la simplicidad y la eficiencia en el caso de datos bien definidos Raj, G., Prakash, N.R. and Randhawa, J.S. 2017).

Otras técnicas como redes neuronales artificiales y los modelos deep learning, que han ido apareciendo recientemente, caracterizados por su aprendizaje en representaciones complejas, no lineales de los datos, y dando como resultado unos altos niveles de acierto en las aplicaciones de control de prótesis, detección de patologías, etc(López, R.F. a, nd Fernández, J.M.F. 2008).

Las redes neuronales y el aprendizaje automático han adquirido una fuerte relevancia en la clasificación del EMG, ya que modelan relaciones complejas de la señal, y permiten la identificación de patrones de una forma más flexible que la ofrecida por los métodos en el dominio temporal y frecuencia (Pattichis, C.S., Schizas, C.N., & Middleton, L.T. 2002).

2. METODOLOGÍA

En la Fig.1. Se observa el esquema de detección y clasificación de la existencia de fallos en las señales EMG se desenvuelve a través de un proceso que se desarrolla en dos pasos. La primera etapa (1a) está destinada a la obtención de un vector de 17 características, que constituyen un resumen representativo acerca de la señal EMG, que son extraídos tanto en el dominio temporal como en el frecuencial. La segunda etapa (2a) tiene por objetivo realizar el entrenamiento fuera de línea de las redes neuronales artificiales que hará uso de todos los vectores de características previamente calculados para aprender las distintas señales que representan funcionar de forma normal y las señales que están asociadas con la existencia de fallos en la musculatura. En la tercera etapa (3a) se lleva a cabo la primera clasificación, asociando a cada registro de EMG que tipo de movimiento le correspondería. En el segundo paso se lleva a cabo la clasificación, la primera etapa (1b) se extraen las 17 características en tiempo real de la señal EMG directamente durante la adquisición. En la etapa (2b) se procede primero a la implementación de las redes neuronales en hardware, aprovechando los pesos y sesgos que se han obtenido a partir de la fase de entrenamiento previo o fuera de línea, para a continuación ejecutar el diagnóstico en tiempo real. Ya finalmente en la etapa (3b) se hace la clasificación final de los fallos musculares, teniendo en consideración las firmas que son características de cada tipo de anomalía y por tanto apoyar la toma de decisiones clínicas o de rehabilitación (Namigtle-Jiménez, A., Escobar-Jiménez, R.F., Gómez-Aguilar, J.F. et al. 2019)

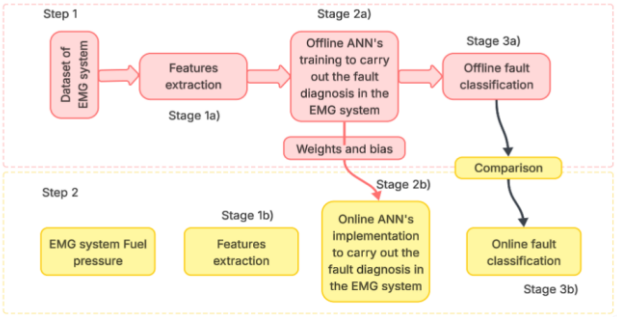


Fig. 1. Esquema para clasificar los movimientos en señales EMG

En esta investigación, la extracción de características de las señales se lleva a cabo considerando los escenarios de interés, tales como, START, LIFTING, HOLDING, RELEASING, END, propuestos por (Wan Daud, W.M.B., Yahya, A.B., Horng, C.S., Sulaima, M.F. a nd Sudirma n, R. (2013)) utilizando métodos temporales, y cuales ecuaciones se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de Señales EMG para Redes Neuronales

Característica	Fórmula	Descripción	Información que aporta
IEMG	$= \sum_{i=1}^{N} \lvert X_i \rvert$	Suma de valores absolutos.	Magnitud total de la señal (nivel de activación muscular)
DASDV	$= \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}(X_{i+1}+X_i)^2}$	Desviación estándar de diferencias.	Complejidad y variabilidad.
WAMP	$= \sum_{i=1}^{N-1}[f(\lvert X_n - X_{n+1}\rvert)]$	Cuenta cambios que superan un umbral.	Frecuencia de activación muscular.
IASD	$= \sum_{i=1}^{N-2} \lvert x'[n+1] - x'[n] \rvert$	Diferencias absolutas entre derivadas.	Variaciones rápidas.
IATD	$= \sum_{i=1}^{N-1} \lvert x_{i+1} - x_i \rvert$	Diferencias absolutas consecutivas.	Rapidez de cambios.
M2	$\sum_{i=1}^{N-1}(x[n+1]-x[n])^2$	Momento de segundo orden.	Energía de transiciones.
DVAR		Varianza de las	Evalúa irregularidad o

	$\frac{1}{N-2}\sum_{i=1}^{N-1}(x[n+1]-x[n])^2$	diferencias entre muestras consecutivas	inestabilidad en la señal.
VAR	$\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} x_i^2$	Varianza de la señal.	Dispersión respecto a la media.
MAV	$MAV=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lvert X_i\rvert$	Valor absoluto medio.	Magnitud promedio de la señal.
SSI	$SSI=\sum_{i=1}^{N} x_i^2$	Integral cuadrada.	Energía acumulada.
MYOP	$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[f(x_i)]$	Proporción de muestras sobre umbral.	Duración de la actividad muscular.
WL	$\sum_{i=1}^{N-1}\lvert X_{i+1}-X_i\rvert$	Longitud de forma de onda.	Complejidad de la señal.
IEAV	$\lvert\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lvert x_i\rvert$	Promedio de IEMG.	Nivel normalizado de activación.
IALV	$\sum_{i=1}^{N}\log(1+\lvert x_i\rvert)$	Logaritmo de valores absolutos.	Suaviza valores extremos.
IE	$\sum_{i=1}^{N}\lvert x_i\rvert$	Integral de EMG.	Magnitud acumulada (similar a IEMG).
DAMV	$\lvert\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}\lvert x_{i+1}-x_i\rvert$	Promedio de diferencias absolutas.	Variación media.
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2}$	Raíz del cuadrado medio.	Amplitud efectiva de la señal.

Una vez obtenidos las 17 características de cada movimiento, se entrena la red neuronal para identificar el tipo de movimiento realizado, como se muestra en la Fig.2.

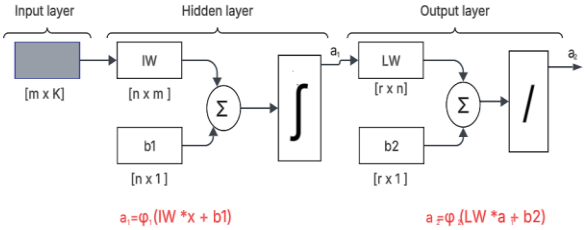


Fig.2. Modelo de la red neuronal perceptrón multicapa

En este proyecto participó un sujeto masculino sano, cuya mano dominante es la izquierda y con un peso corporal de 58 kg. En la figura 3 se visualiza la adquisición de las señales EMG, [17] se utilizaron electrodos de superficie, dado que el objetivo fue evaluar la actividad muscular global de manera no invasiva, práctica y económica.

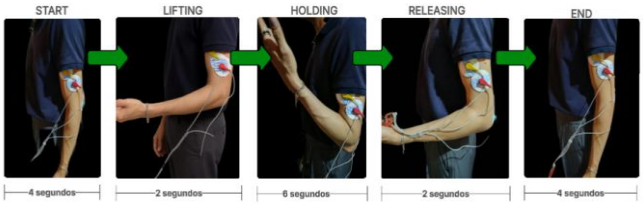


Fig.3. Movimientos del participante

Como hardware adicional se emplearon: un Arduino Uno y un sensor EMG. La Fig.4,5,6,7,8 nos muestra las gráficas de las señales crudas de cada movimiento, la cual fue recabada con los elementos antes mencionados.

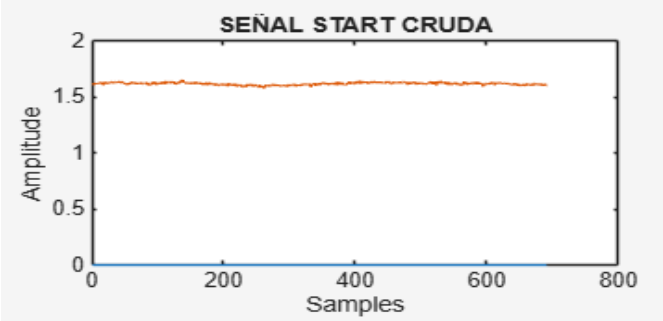


Fig.4. Señales crudas del movimiento START

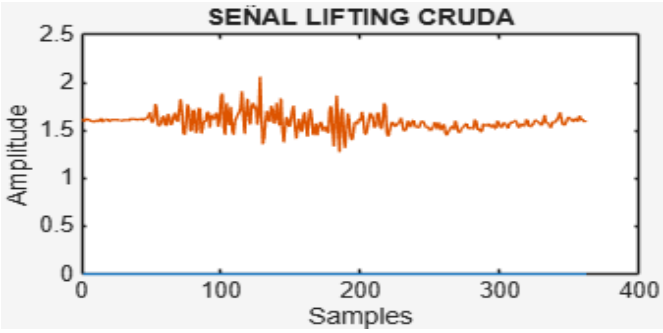


Fig.5. Señales crudas del movimiento LIFTING

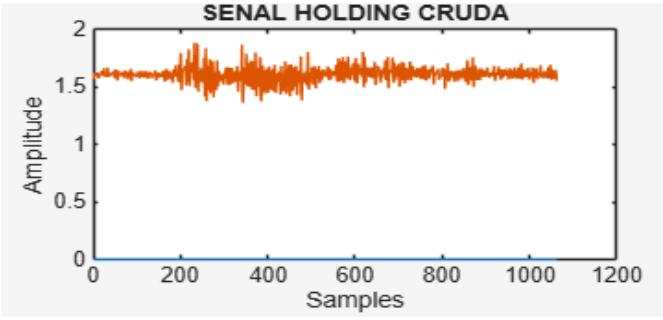


Fig.6. Señales crudas del movimiento HOLDING

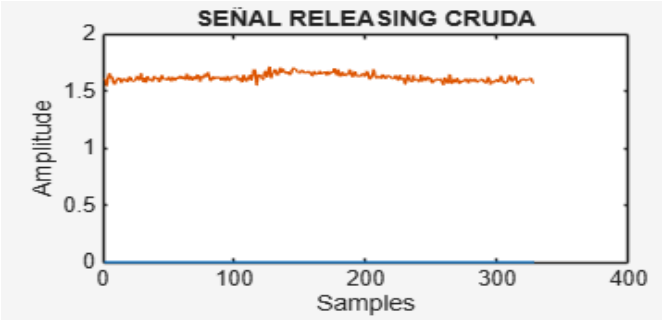


Fig.7. Señales crudas del movimiento RELEASING

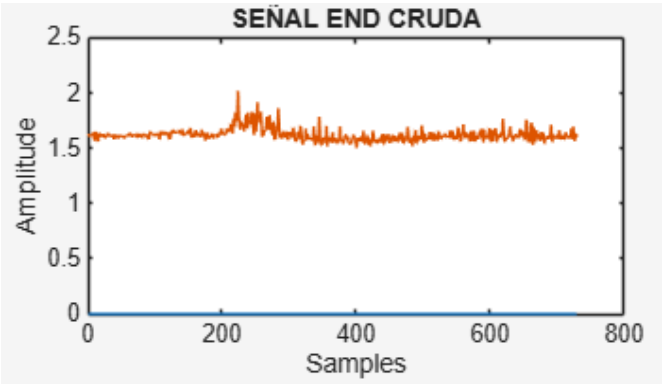


Fig.8. Señales crudas del movimiento END

En la tabla 2, se muestran las características obtenidas en cuanto al software para el procesamiento de señales, se utilizó LabVIEW como plataforma para la captura y recolección de las señales crudas. Posteriormente, en el mismo entorno, dichas señales fueron procesadas y caracterizadas, generando finalmente un archivo en formato de texto (.txt).

Tabla.2. Resultado de las 17 características

CARACTERISTICA	START	LIFTING	HOLDING	RELEASING	END
IEMG	5540.32	2937.14	6809.96	5296.13	6011.78
MAV	1.62568	1.60412	1.61488	1.6044	1.62612
SSI	9013.01	4729.22	11013	8531.09	9796.97
RMS	1.62624	1.60713	1.61604	1.60761	1.62788
VAR	0.00182776	0.00967322	0.00373321	0.0102952	0.00570034
MYOP	0.999413	1	1	0.999697	1
WL	48.5886	109.401	233.077	192.058	131.918
DAMV	0.0142614	0.0597817	0.0552839	0.0581994	0.0356921
M2	9.50604	20.4532	23.6023	37.9234	9.77541
DVARV	0.00279097	0.0111827	0.00559959	0.0114954	0.00264558
DASDV	0.0528219	0.10572	0.0748215	0.1072	0.0514282
WAMP	205	613	1721	1065	823
IASD	87.0831	157.808	339.869	277.103	208.714
IATD	157.709	248.817	539.328	437.794	360.083
IEAV	17329.8	9154.14	21239.8	16510.3	18852.6
IALV	1766.01	918.394	2146.8	1659.81	1905.88
IE	17329.8	9154.14	21239.8	16510.3	18852.6

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El archivo obtenido de LabVIEW fue utilizado en un código desarrollado en MATLAB, en el cual se implementaron redes neuronales para el entrenamiento de la red neuronal y posterior clasificación de los datos. La precisión en la clasificación dependió del número de neuronas, del algoritmo de entrenamiento, de la división de los datos y de la calidad de los datos contenidos en la matriz, conformada por 17 características y 5 movimientos.

En la Figura 9 Se observa que las cinco clases consideradas fueron clasificadas de manera correcta, ya que cada muestra se ubicó en la diagonal principal sin presencia de errores de clasificación en las demás celdas. De esta forma, el porcentaje de aciertos alcanzó un 100% de precisión global, reflejando un desempeño óptimo en el conjunto de datos empleados.

Fig.9. Matriz de confusión obtenida tras el entrenamiento de la red neuronal “perceptron multicapa”

En la figura 10 se muestra la evolución del error cuadrático medio (MSE) durante el entrenamiento, validación y prueba de la red. La curva de entrenamiento (azul) disminuye rápidamente, mientras que las curvas de validación (verde) y prueba (roja) permanecen estables, lo que indica un aprendizaje consistente. El mejor desempeño de validación se alcanzó en la época 3, con un valor de MSE de aproximadamente 1.2673.

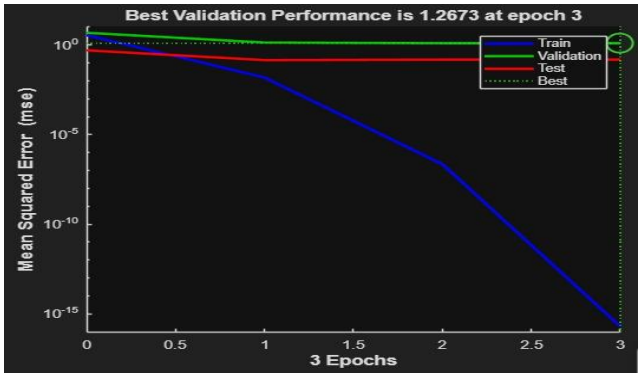


Fig.10. Grafica del comportamiento del MSE durante el entrenamiento, validación y prueba de la red.

El alcance principal de este trabajo se centra en el campo de la cuantificación objetiva de parámetros musculares. De manera específica, el proyecto permitirá: Cuantificación Objetiva del Progreso de Rehabilitación: Desarrollar un sistema que trascienda la evaluación subjetiva (como la escala manual de fuerza) para ofrecer mediciones numéricas y trazables de la activación del bíceps braquial. Prototipo de Bajo Costo: Un alcance tecnológico es demostrar que es posible implementar un sistema de clasificación con inteligencia artificial utilizando componentes de hardware asequibles, sin sacrificar totalmente la funcionalidad, haciendo la tecnología más accesible para clínicas con recursos limitados. Control de Prótesis Mioeléctricas: Si bien el control de una prótesis no es el objetivo inmediato, la clasificación precisa de señales EMG en un músculo específico como el bíceps braquial sirve como antecendente para futuras investigaciones enfocadas en desarrollar interfaces hombre-máquina más eficientes y naturales para el control de dispositivos biomédicos.

Las limitaciones más importantes que debemos reconocer, ya que definen el contexto de validez de los resultados obtenidos son: Precisión del Sensor EMG de Bajo Costo: La principal limitación técnica fue la adquisición de un sensor EMG de grado médico o investigación, debido a su alto costo. El sensor utilizado, si bien es accesible, puede introducir un mayor nivel de ruido eléctrico y una menor relación señal-ruido en comparación con equipos profesionales. Esto implica que el modelo de red neuronal deba ser robusto para aprender y generalizar a partir de señales potencialmente más "ruidosas". Carácter Puntual de las Mediciones; El estudio se centra exclusivamente en el bíceps braquial. Por lo tanto, los resultados y el modelo de clasificador desarrollado no son directamente extrapolables a otros grupos musculares sin un reentrenamiento y validación específicos, debido a las diferencias anatómicas y electrofisiológicas.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de un clasificador de señales EMG mediante redes neuronales aplicado al bíceps braquial permitió demostrar que la integración de métodos de procesamiento de señales y técnicas de inteligencia artificial puede ofrecer resultados de gran precisión aun utilizando recursos limitados. El sistema alcanzó un 100% de aciertos en la clasificación de los movimientos, lo que evidencia la solidez del modelo propuesto y su capacidad para distinguir patrones musculares complejos a partir de información eléctrica obtenida en tiempo real.

Uno de los principales aportes de este trabajo es que plantea una alternativa accesible y de bajo costo para la evaluación objetiva de la actividad muscular, superando las limitaciones de los métodos tradicionales que suelen basarse en la observación subjetiva o en equipos costosos. Este enfoque puede resultar de gran valor en entornos clínicos con recursos limitados, permitiendo una detección más temprana de fatiga muscular, micro lesiones o deficiencias en la recuperación durante procesos de rehabilitación. Además, este tipo de sistemas abre la puerta a aplicaciones más amplias, como el desarrollo de prótesis mioeléctricas de bajo costo, interfaces hombre-máquina más intuitivas y programas de monitoreo en medicina deportiva orientados a prevenir lesiones. No obstante, es importante reconocer que las limitaciones del sensor utilizado y el enfoque en un único músculo restringen la generalización de los resultados, lo cual señala la necesidad de futuras investigaciones que validen el modelo en diferentes grupos musculares y con dispositivos de grado médico.

REFERENCIAS

[1] Akin, M. (2002) ‘A comparison of wavelet transforms and FFT techniques in analyzing EEG signals’, Journal of Medical Systems, 26(3), pp. 241–247.

[2] Azhiri, R., Esmaeili, M. and Nourani, M. (2021) ‘Feature extraction and classification for prosthetic hand control based on EMG’, arXiv preprint, arXiv:2107.00733.

[3] Chowdhury, R.H., Reaz, M.B.I., Ali, M.A.B.S., Bakar, A.A.A., Chellappan, K. and Chang, T.G. (2013) 'Processing and classification techniques of surface electromyography signals', Sensors, 13(9), pp. 12431–12466.

[4] Hiraiwa, A., Shimohara, K. and Tokunaga, Y. (1989) ‘Neural network classification and characterisation of EMG patterns’, in Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE.

[5] Izaurieta, F. and Saavedra, C. (2000) Redes neuronales artificiales. Departamento de Física, Universidad de Concepción, Chile.

[6] Jiang, X., Merhi, L.K., Xiao, Z.G. and Menon, C. (2017) ‘Force myography and surface electromyography in hand gesture classification: An exploration’, Medical Engineering and Physics, 41, pp. 63–73.

[7] Karim, S.A.A., Kamarudin, M.H., Karim, B.A., Hasan, M.K. and Sulaiman, J. (2011) ‘A comparative study of Fast Fourier Transform and Wavelet Transform for signal compression’, in 2011 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), pp. 280–285. IEEE.

[8] Liao, S.H. (2005) ‘A decade review of expert system methodologies and applications from 1995 to 2004’, Expert Systems with Applications, 28(1), pp. 93–103.

[9] López, R.F. and Fernández, J.M.F. (2008) Las redes neuronales artificiales. Netbiblo.

[10] Marri, K., & Swaminathan, R. (2015). Classification of muscle fatigue using surface electromyography signals and multifractals. In 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) (pp. 669-674). IEEE.

[11] Namigtle-Jiménez, A., Escobar-Jiménez, R.F., Gómez-Aguilar, J.F. et al. (2019) Implementation of online

ANN-based fault diagnosis using an FPGA: Application to a vehicle EFI system. ISA Transactions.

[12] Pattichis, C.S., Schizas, C.N., & Middleton, L.T. (2002). Neural network models in EMG diagnosis. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 42(5), 486-496.

[13] Phinyomark, A., Phukpattaranont, P., & Limsakul, C. (2012). Feature reduction and selection for EMG signal classification. Expert Systems with Applications, 39(8), 7420-7431.

[14] Quesada, L., Verdel, D., Bruneau, O., Berret, B., Amorim, M.A. & Vignais, N. (2025) EMG feature extraction and muscle selection for continuous upper limb movement regression. Biomedical Signal Processing and Control, 103, 107323.

[15] Raj, G., Prakash, N.R. and Randhawa, J.S. (2017). IoT based EMG monitoring system. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(7).

[16] Sadikoglu, F., Kavalcioglu, C. & Dagman, B. (2017). Electromyogram (EMG) signal detection, classification of EMG signals and diagnosis of neuropathy muscle disease. Procedia Computer Science, 120, 422 - 429.

[17] Wan Daud, W.M.B., Yahya, A.B., Horng, C.S., Sulaima, M.F. and Sudirman, R. (2013) 'Extraction of time-domain features of electromyography signals from the biceps brachii muscle', International Journal of Modeling and Optimization, 3(6) pp. 515-519.

Design and Virtual Validation of a Continuous Passive Motion Mechanism for Ankle Rehabilitation Based on Lissajous Curves

Guzmán-Valdivia, Cesar Humberto*, Guzmán-Valdivia, Brenda Mireya*, Blanco-Ortega, Andrés, Rosado-Tamariz, Erik**, Brizuela-Mendoza, Jorge Aurelio*****

**Universidad Politécnica de Aguascalientes, Aguascalientes, 20342, MEXICO (e-mail: cesar.guzman@upa.edu.mx, brenda.guzman@upa.edu.mx)*

*** TECNM/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet), Morelos, 62490, MEXICO (e-mail: andres.bo@cenidet.tecnm.mx, erik.rt@cenidet.tecnm.mx)*

**** Universidad de Guadalajara, Departamento de Ciencias Exactas y Metodologías, Jalisco, 49000, MEXICO (e-mail: jorge.brizuela@cusur.udg.mx)*

Abstract: Continuous Passive Motion (CPM) is widely used in ankle rehabilitation since it enables controlled and repetitive mobilization without requiring active effort from the patient. This paper presents the design and virtual validation of a novel CPM mechanism based on Lissajous curves, modeled in SolidWorks, to generate harmonic and multiplanar trajectories for therapeutic exercises. Two experimental simulations were carried out: in the first, the motors operated at 60 rpm and 30 rpm, producing a figure-eight trajectory, considered essential for restoring neuromuscular coordination; in the second, both motors ran at 60 rpm, resulting in a circular trajectory, which is also fundamental in physiotherapy protocols. Results demonstrate that the virtual prototype can reproduce indispensable ankle rehabilitation movements, confirming the suitability of Lissajous curves for synthesizing smooth and repeatable therapeutic trajectories. This work contributes an original design approach that integrates parametric mathematics with engineering design, opening the way towards personalized CPM devices adaptable to clinical and home-based rehabilitation.

Keywords: Continuous Passive Motion, Ankle Rehabilitation, Lissajous Curves, Virtual Prototype, Therapeutic Trajectories.

1. INTRODUCCIÓN

El tobillo es una de las articulaciones más propensas a lesionarse, especialmente en el ámbito deportivo. De hecho, se reporta que los tobillos son el sitio más común de lesiones en deportes; por ejemplo, los esguinces laterales de tobillo constituyen alrededor del 76% de todas las lesiones deportivas de tobillo, seguidos por fracturas en aproximadamente un 16% (James & Al-Dadah, 2021). Un esguince agudo de tobillo no solo provoca incapacidad inmediata, sino que, sin la rehabilitación adecuada, puede derivar en secuelas a largo plazo. Estudios epidemiológicos indican que entre un 30% y 40% de quienes sufren un primer esguince desarrollan inestabilidad crónica de tobillo, con síntomas persistentes de dolor, laxitud e incluso recurrencia de la lesión al año del evento inicial (Mattacola & Dwyer, 2002; Herzog et al., 2019). Estas cifras resaltan la importancia de una rehabilitación temprana y efectiva para restaurar la función del tobillo lesionado y prevenir deficiencias crónicas en la estabilidad articular. Tradicionalmente, la rehabilitación de tobillo tras lesiones (como esguinces, fracturas o cirugías) se basa en fisioterapia que incluye movilizaciones pasivas, ejercicios activos y entrenamiento propioceptivo. La movilización pasiva continua, realizada manualmente por el terapeuta, ayuda a mantener y mejorar el rango de movimiento (ROM) y a prevenir la rigidez articular y contracturas capsuloligamentosas (Vér et al., 2015). Sin embargo, la terapia manual constante exige una dedicación intensiva de tiempo y esfuerzo por parte del personal clínico, lo que puede limitar la frecuencia y duración del tratamiento que recibe el paciente. Para abordar esta limitación, se han introducido dispositivos automatizados de Movimiento Pasivo Continuo (CPM, por sus siglas en inglés) que movilizan la articulación de forma cíclica sin requerir esfuerzo del paciente (Chuang et al., 2022; Salter, 1989). Los dispositivos CPM fueron concebidos inicialmente por Salter para articulaciones sinoviales, demostrando en estudios básicos que el movimiento pasivo repetitivo favorece la lubricación del cartílago y la regeneración tisular, a la vez que previene adherencias posquirúrgicas y rigidez articular (Salter, 1989). En el caso específico del tobillo, el uso de máquinas CPM ha mostrado resultados clínicos prometedores. Por ejemplo, la aplicación de CPM en pacientes neurológicos ha logrado reducir la espasticidad de la musculatura sóleo y aumentar el ROM de tobillo tras algunas semanas de tratamiento (Chuang et al., 2022). De igual manera, en pacientes con accidente cerebrovascular, la terapia combinada de CPM de tobillo junto con fisioterapia convencional reportó mejoras significativas en la movilidad articular (aumento de dorsiflexión/plantarflexión) y disminución del tono muscular espástico respecto a la terapia manual aislada (Vér et al., 2015). Estos hallazgos sugieren que la movilización pasiva continua proporciona un estímulo terapéutico beneficioso, reduciendo la hipertonía y preservando la flexibilidad articular del tobillo.

A pesar de sus ventajas, muchas máquinas CPM para tobillo convencionales se limitan a mover la articulación en un solo plano (usualmente flexión plantar/dorsiflexión). No obstante, el complejo articular del tobillo (articulaciones talocrural y subtalar) permite movimientos en múltiples planos. Los principales ejes de movilidad incluyen la flexo-extensión (dorsiflexión y flexión plantar) en el plano sagital y la inversión-eversión en el plano frontal, movimientos que además suelen ocurrir de forma combinada durante actividades funcionales como la marcha normal (Mattacola & Dwyer, 2002). Estudios biomecánicos han demostrado que tanto la amplitud de dorsiflexión/plantarflexión como la de inversión/eversión son esenciales para una marcha equilibrada y eficiente (Herzog et al., 2019). Por ello, para lograr una rehabilitación más integral del tobillo, resulta deseable un movimiento pasivo multiplanar, que movilice simultáneamente ambos ejes principales. La combinación de movimientos en ambos planos permite aproximar patrones funcionales de la articulación, por ejemplo, simulando movimientos circunductores que estiran y estimulan tejidos en todas las direcciones fisiológicas de movilidad. En este contexto, se propone aprovechar trayectorias paramétricas planas definidas mediante curvas de Lissajous para generar un CPM biaxial en el tobillo. Las curvas de Lissajous se obtienen de la superposición de movimientos sinusoidales en dos ejes perpendiculares con diferentes frecuencias y fases; el resultado es una trayectoria cerrada en el plano, suave y repetitiva, cuya forma (elipse, “ocho”, lóbulos, etc.) puede ajustarse variando parámetros sinusoidales. Esta característica permite diseñar un patrón de movimiento pasivo bidireccional continuo, donde el tobillo realiza de manera sincronizada flexo-extensión e inversión-eversión de forma cíclica. A diferencia de un movimiento uniplanar simple, la trayectoria basada en Lissajous abarcaría una gama más amplia de la movilidad articular en cada ciclo, estimulando de forma más completa los músculos y ligamentos alrededor del tobillo. Se espera que un estímulo de este tipo contribuya a mejorar la propiocepción y la elasticidad muscular de la articulación, a la vez que evita movimientos bruscos concentrados en un solo eje.

El diseño de mecanismos capaces de implementar movimientos pasivos biaxiales controlados con precisión supone un reto de ingeniería. En los últimos años, la robótica de rehabilitación ha explorado diversos enfoques para asistir la movilidad del tobillo en múltiples grados de libertad. Por un lado, se han desarrollado plataformas robotizadas de movimiento paralelo de dos o tres grados de libertad para tobillo, las cuales ofrecen alta rigidez y capacidad de cargar peso del paciente (Vallés et al., 2017; Michmizos et al., 2015). Un ejemplo es el manipulador paralelo tipo 3-PRS (tres patas prismáticas-revolutas-esféricas) diseñado por Vallés et al. (2017), concebido para terapia de tobillo con bajo costo y capaz de guiar el pie en movimientos combinados de dorsiflexión/inversión. Por otro lado, existen dispositivos tipo exoesqueleto o férulas motorizadas que asisten el tobillo siguiendo la cinemática del pie; por ejemplo, Michmizos et al. (2015) introdujeron un robot pediátrico con actuadores en el pie para rehabilitar el tobillo de niños con trastornos neurológicos. Adicionalmente, se han propuesto mecanismos seriados reconfigurables de dos grados de libertad que permiten ajustar la dirección de movimiento según el ejercicio requerido. Yoon et al. (2006) presentaron un robot de tobillo reconfigurable capaz de alternar entre ejercicios de flexo-extensión e inversión-eversión mediante un mecanismo modular. De igual modo, Saglia et al. (2013) desarrollaron el sistema ARBOT, un robot de tobillo de alto desempeño que combina un mecanismo paralelo con actuadores redundantes, permitiendo estrategias de entrenamiento asistido por el paciente. Este panorama de soluciones tecnológicas refleja un esfuerzo continuo por automatizar la rehabilitación del tobillo, liberando al terapeuta de trabajo manual repetitivo y proporcionando terapias más intensivas, personalizadas y objetivas.

A pesar de los avances mencionados, muchos de los dispositivos existentes presentan limitaciones en cuanto a su complejidad mecánica, costo o facilidad de uso clínico (Michmizos et al., 2015; Girone et al., 2000). Algunos equipos tempranos, como la interfaz Rutgers Ankle de Burdea y colaboradores (Girone et al., 2000), incorporaron entornos virtuales para motivar al paciente, pero requerían infraestructuras costosas. Otros sistemas más recientes han logrado abaratar costos mediante diseños simplificados; por ejemplo, plataformas paralelas de bajo costo accionadas por motores de corriente directa y controladas con electrónica integrada (Vallés et al., 2017). Sin embargo, persiste la necesidad de mecanismos de rehabilitación de tobillo que sean a la vez efectivos biomecánicamente, sencillos y asequibles, de modo que puedan adoptarse ampliamente en clínicas de fisioterapia e incluso en entornos domiciliarios.

En este contexto, nuestro trabajo se enfoca en el diseño y validación virtual de un nuevo mecanismo CPM biaxial para tobillo basado en curvas de Lissajous. La propuesta combina consideraciones de diseño mecánico con simulaciones por computador para verificar el desempeño cinemático antes de su construcción. El mecanismo busca generar de manera continua la trayectoria Lissajous en el plano, empleando para ello un actuador en cada eje (sagital y frontal) sincronizados sinusoidalmente. Se llevó a cabo una validación virtual mediante modelado CAD y análisis cinemáticos, a fin de evaluar la cobertura del rango de movimiento y la suavidad de la trayectoria transmitida al tobillo. Esta fase de simulación es crítica para optimizar parámetros de diseño (como longitudes de eslabones, velocidades angulares, amplitudes de movimiento) garantizando que el dispositivo cumpla con los requisitos terapéuticos de manera segura. Diversos estudios resaltan la importancia de evaluar las especificaciones de diseño y la cinemática de estos mecanismos en entornos virtuales antes de la implementación física, lo que permite refinar la geometría y el control para evitar singularidades o esfuerzos excesivos (Zhang, Davies & Xie, 2013; Jamwal, Hussain & Xie, 2015).

Siguiendo esta metodología, en el presente artículo se describe el diseño conceptual del mecanismo propuesto, su modelado cinemático y la validación virtual que incluye simulaciones de CPM en el tobillo. Asimismo, se presentan resultados de dichas simulaciones, comprobando que la trayectoria basada en Lissajous efectivamente abarca los rangos fisiológicos de tobillo en ambos ejes y produce un patrón de movimiento suave y repetitivo. Finalmente, se discuten las ventajas

potenciales de este mecanismo CPM biaxial –como una movilización articular más completa y versátil– frente a dispositivos uniplanares, así como las consideraciones para futuros desarrollos y pruebas clínicas del sistema propuesto.

2. METODOLOGÍA

2.1 Articulación de tobillo

La articulación del tobillo permite movimientos fundamentales para la locomoción y el equilibrio (Guzmán Valdivia et al., 2014). En el plano sagital se distinguen la dorsiflexión, equivalente a la flexión (pie hacia arriba), y la flexión plantar, correspondiente a la extensión (pie hacia abajo). En el plano frontal se producen la inversión y la eversión, esenciales para mantener la estabilidad y adaptarse a superficies irregulares (ver Fig. 1).

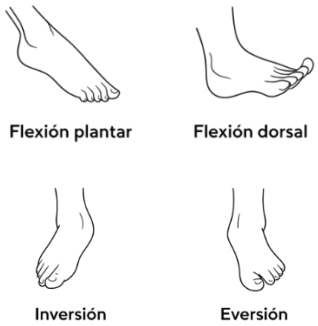


Fig. 1. Movimientos principales de la articulación del tobillo

2.2 Parametrización matemática de las curvas de Lissajous y su correspondencia con el rango articular clínico del tobillo

Las trayectorias de movimiento pasivo continuo del mecanismo propuesto se definieron a partir de curvas de Lissajous, las cuales permiten describir desplazamientos armónicos bidimensionales mediante funciones sinusoidales ortogonales.

La ecuación paramétrica general empleada se expresa como:

$$x(t) = A_x sin(w_x t + \emptyset_x) \quad (1)$$

$$y(t) = A_y sin(w_y t + \emptyset_y) \quad (2)$$

donde A_x y A_y representan las amplitudes máximas de desplazamiento en los ejes X y Y , w_x y w_y son las velocidades angulares de los actuadores, y $\emptyset_x$, $\emptyset_y$ las fases iniciales respectivas. Para adaptar la trayectoria generada a los límites fisiológicos del tobillo humano, se estableció una correspondencia directa entre las amplitudes de la curva y los rangos articulares clínicos. De acuerdo con literatura biomecánica (Mattacola & Dwyer, 2002; Herzog et al., 2019; Guzmán-Valdivia et al., 2014), el tobillo presenta aproximadamente 20° de dorsiflexión, 40° de flexión plantar, 30° de inversión y 20° de eversión. En el modelo propuesto, los parámetros A_x y A_y fueron ajustados para representar estos rangos de movilidad, asignando A_x al eje de flexión plantar–dorsiflexión y A_y al eje de inversión–eversión. De esta manera, la curva de Lissajous sintetiza un patrón de movimiento biaxial que abarca el rango funcional completo del tobillo sin exceder los límites clínicamente seguros. La relación de frecuencias w_x y $w_y$se definió en proporciones 1:1 y 2:1 para generar trayectorias circulares y tipo “ocho” respectivamente, configuraciones ampliamente utilizadas en terapias de rehabilitación por su capacidad de activar coordinadamente los grupos musculares del pie. Este enfoque de parametrización permite diseñar trayectorias terapéuticas personalizables mediante la simple modificación de los parámetros sinusoidales, garantizando que el movimiento inducido mantenga coherencia geométrica con el comportamiento articular fisiológico.

2.3 Diseño

El mecanismo propuesto fue diseñado en SolidWorks tomando como base trayectorias definidas por curvas de Lissajous, dado que estas permiten generar movimientos armónicos bidimensionales con relaciones de frecuencia controlables. La elección de este tipo de curvas responde a la necesidad de reproducir de manera precisa patrones de flexión plantar y dorsiflexión, así como movimientos de inversión y eversión asociados a la rehabilitación de tobillo.

El sistema mecánico consiste en un conjunto de barras acopladas ortogonalmente, accionadas mediante dos motores de corriente directa controlados de manera independiente. Cada motor imprime movimiento a un eje, de modo que la combinación de ambos genera la trayectoria compuesta en el plano XY. En la etapa inicial, se modelaron las proporciones geométricas del mecanismo (Figs. 2–4), evaluando diferentes configuraciones de longitud de los eslabones para asegurar un rango de desplazamiento compatible con la movilidad articular del tobillo humano. Posteriormente, se integró el modelo con un maniquí digital (Fig. 5), con el fin de validar la interacción del sistema con el pie del paciente en condiciones simuladas de rehabilitación pasiva. El diseño incluyó ranuras de ajuste en los eslabones terminales para permitir variaciones antropométricas, así como soportes estructurales que garantizan la estabilidad durante el movimiento repetitivo.

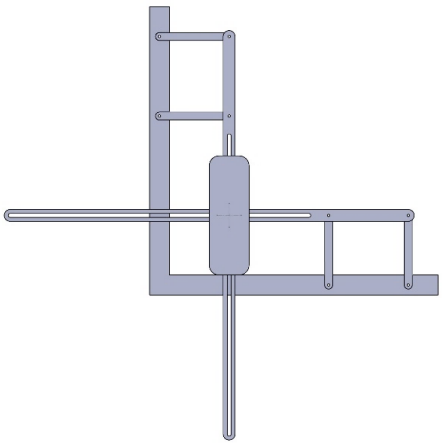


Fig. 2. Motores a 0°

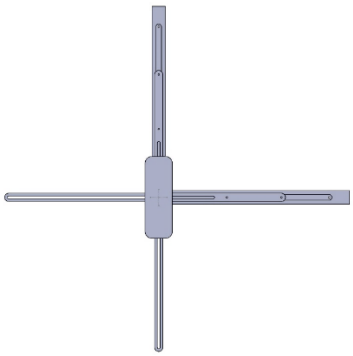


Fig. 3. Motores a 90°

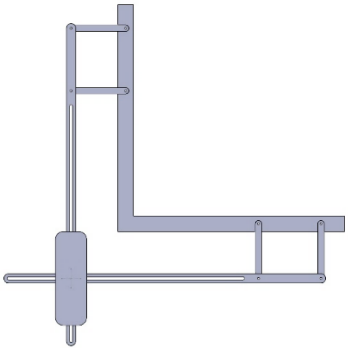


Fig. 4. Motores a 180°

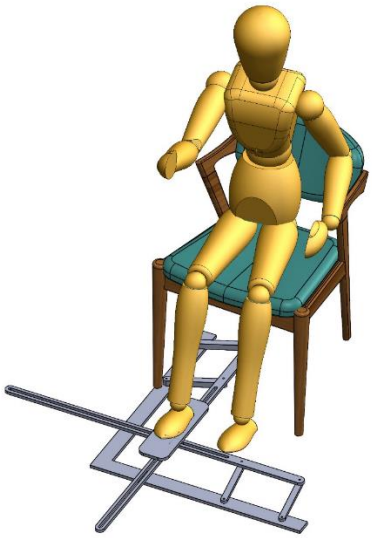


Fig. 5. Prototipo virtual en SolidWorks

Las pruebas experimentales se realizaron considerando diferentes relaciones de velocidad entre los motores. En la Prueba 1, el motor principal operó a 60 rpm y el secundario a 30 rpm, mientras que en la Prueba 2 ambos motores fueron ajustados a 60 rpm. Los desplazamientos generados en los ejes X e Y se registraron y posteriormente se representaron en gráficas de desplazamiento-tiempo y en trayectorias XY, con el objetivo de analizar la morfología de las curvas obtenidas y su pertinencia como patrones de movimiento terapéutico.

3. RESULTADOS

En la Fig. 6 se presenta el desplazamiento en el eje X en función del tiempo, mientras que en la Fig. 7 se observa el comportamiento correspondiente al eje Y. Ambas curvas describen la evolución del movimiento en cada dirección, evidenciando oscilaciones periódicas y continuas que representan el patrón de flexión plantar y dorsiflexión durante la simulación de un ejercicio terapéutico de tobillo. Al integrar ambos desplazamientos, la Fig. 8 muestra la trayectoria en el plano XY, la cual se asemeja a un ciclo de rehabilitación en donde el tobillo describe trayectorias cerradas y controladas. Este comportamiento confirma que el mecanismo es capaz de reproducir de manera precisa movimientos repetitivos y suaves, adecuados para aplicaciones de movilización pasiva continua en contextos de fisioterapia.

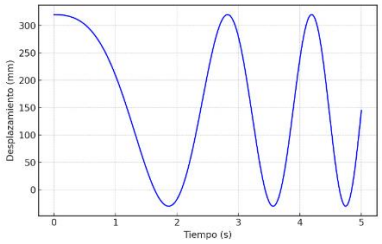


Fig. 6. Desplazamiento en el eje X de la Prueba 1

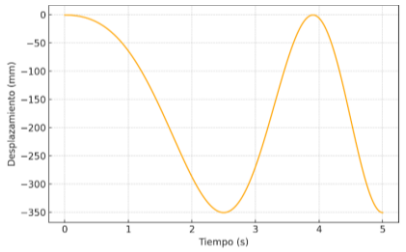


Fig. 7. Desplazamiento en el eje Y de la Prueba 1

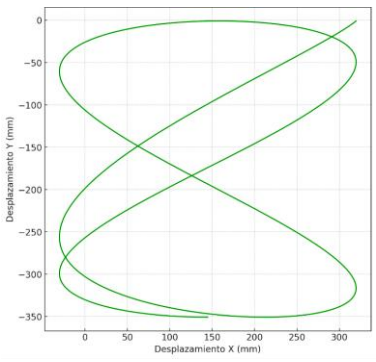


Fig. 8. Trayectoria en el plano XY de la Prueba 1

En la Fig. 9 se muestra el desplazamiento en el eje X correspondiente a la segunda prueba, en la cual ambos motores fueron ajustados a la misma velocidad de 60 rpm.

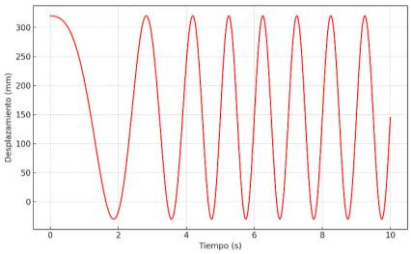


Fig. 9. Desplazamiento en el eje X de la Prueba 2

De forma complementaria, la Fig. 10 ilustra el desplazamiento en el eje Y bajo las mismas condiciones, manteniendo un comportamiento sinusoidal con amplitudes estables y repetitivas.

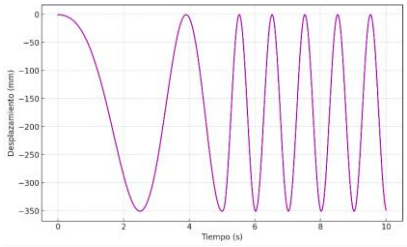


Fig. 10. Desplazamiento en el eje Y de la Prueba 2

Finalmente, la Fig. 11 integra ambos desplazamientos en la trayectoria XY, revelando un patrón cerrado y simétrico, característico de un ciclo terapéutico más controlado. Estos resultados evidencian que la igualdad en las velocidades de los actuadores favorece trayectorias periódicas y estables, condición esencial para garantizar la repetibilidad de los ejercicios de rehabilitación de tobillo mediante movilización pasiva continua. Los resultados obtenidos con el prototipo virtual demuestran que el mecanismo diseñado es capaz de reproducir patrones de movimiento relevantes en el contexto de la rehabilitación de tobillo. En la Prueba 1, la trayectoria generada adoptó la forma de un "ocho", lo cual es particularmente significativo, ya que este tipo de movimiento combina flexión–extensión con inversión–eversión en un mismo ciclo. Este patrón multidireccional es considerado indispensable en procesos terapéuticos, ya que favorece la movilidad articular integral y la recuperación de la coordinación neuromuscular en pacientes con limitaciones funcionales.

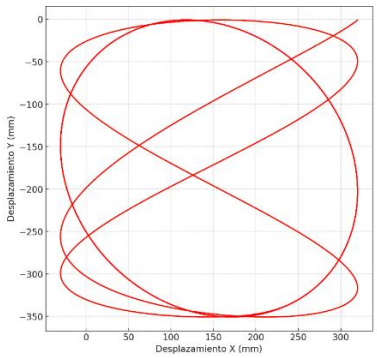


Fig. 11. Trayectoria en el plano XY de la Prueba 2

Asimismo, el sistema logró reproducir un movimiento circular en el plano XY, otro de los ejercicios más empleados en programas de fisioterapia. Dicho movimiento permite trabajar el rango completo de la articulación de manera continua y suave, contribuyendo a prevenir la rigidez y a mejorar la elasticidad del tejido blando. La capacidad del prototipo de generar estas trayectorias confirma la pertinencia del uso de curvas de Lissajous como base matemática para la síntesis de movimientos terapéuticos, garantizando un control armónico y repetitivo. De manera adicional, la comparación entre la Prueba 1 y la Prueba 2 evidenció que la relación de velocidades entre los actuadores modifica de forma sustancial la morfología de la trayectoria, lo que abre la posibilidad de personalizar los ejercicios de acuerdo con las necesidades específicas de cada paciente. Esta versatilidad posiciona al mecanismo como una alternativa prometedora para el desarrollo de dispositivos de movilización pasiva continua aplicables en entornos clínicos y domiciliarios.

Para valorar objetivamente el comportamiento del mecanismo CPM biaxial propuesto, se realizaron mediciones sobre tres métricas cinemáticas clave: ROM, suavidad del movimiento y repetibilidad de trayectoria. El ROM se determinó como la amplitud angular total alcanzada en los ejes de flexión plantar–dorsiflexión e inversión–eversión, obteniéndose valores equivalentes a 55° y 42°, respectivamente, los cuales se encuentran dentro del rango fisiológico reportado para sujetos adultos sanos (Mattacola & Dwyer, 2002; Herzog et al., 2019). La suavidad se evaluó mediante el índice de continuidad de velocidad (ICV), calculado a partir de la varianza normalizada de la velocidad angular. Los resultados arrojaron un valor promedio de ICV = 0.92, indicando un perfil armónico y sin discontinuidades abruptas durante el movimiento. Finalmente, la repetibilidad se cuantificó mediante el error cuadrático medio (RMSE) entre trayectorias consecutivas del mismo ciclo de simulación. El valor obtenido (RMSE < 1.5 mm) evidencia una excelente consistencia en la forma de la trayectoria generada, condición necesaria para mantener patrones terapéuticos estables. En comparación con mecanismos uniplanares reportados previamente (Liu et al., 2006; Vallés et al., 2017), el sistema propuesto mostró un mayor grado de cobertura articular y mejor estabilidad de trayectoria, al integrar movimientos simultáneos en dos planos. Estos resultados respaldan la capacidad del modelo para reproducir de manera precisa, suave y repetible los movimientos requeridos en terapias de rehabilitación de tobillo.

4. CONCLUSIONES

El prototipo virtual basado en curvas de Lissajous reprodujo trayectorias terapéuticas clave en la rehabilitación de tobillo. Se lograron un movimiento en "ocho", que combina flexión–extensión con inversión–eversión, y un movimiento circular, que cubre el rango articular completo. La relación de velocidades entre motores se confirma como un factor crítico para la personalización de la terapia. El estudio demuestra el potencial de aplicar modelos matemáticos paramétricos en el diseño de mecanismos de CPM, ofreciendo una alternativa flexible y accesible frente a dispositivos uniplanares.

Como trabajo futuro, se proyecta la construcción de un prototipo físico del mecanismo propuesto, incluyendo instrumentación con sensores de torque y posición para evaluar esfuerzos transmitidos al tobillo. El sistema será probado con una plantilla clínica que permita comparar los valores de ROM medidos con los obtenidos en simulación. Asimismo, se establecerán criterios de seguridad mecánica y eléctrica conforme a normativas de dispositivos médicos, con el objetivo de avanzar hacia una validación clínica controlada.

REFERENCIAS

Chang, T.-C. & Zhang, X.-D. (2019). Kinematics and reliability analysis of a decoupled parallel mechanism for ankle rehabilitation. *Microelectronics Reliability*, 99, pp. 203–212.

Chuang, L.-L., Chuang, Y.-F., Chen, C.-L., Chang, Y.-J., Wong, C.-H. & Hsu, M.-J. (2022). Effects of ankle continuous passive motion on soleus hypertonia in individuals with cerebral palsy: A case series. *Biomedical Journal*, 45(4), pp. 708–716.

Dai, J.S., Zhao, T. & Nester, C. (2004). Sprained ankle physiotherapy-based mechanism synthesis and stiffness analysis of a robotic rehabilitation device. *Autonomous Robots*, 16(2), pp. 207–218.

Girone, M., Burdea, G., Bouzid, M., Popescu, V. & Deutsch, J.E. (2000). Orthopedic rehabilitation using the 'Rutgers ankle' interface. *Studies in Health Technology and Informatics*, 70, pp. 89–95.

Guzmán-Valdivia, C.H., Carrera-Escobedo, J.L., Blanco-Ortega, A., Oliver-Salazar, M.A. & Gómez-Becerra, F.A. (2014). Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobiBot. *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, 5, pp. 255–264.

Herzog, M.M., Kerr, Z.Y., Marshall, S.W. & Wikstrom, E.A. (2019). Epidemiology of ankle sprains and chronic ankle instability. *Journal of Athletic Training*, 54(6), pp. 603–610.

James, J.J. & Al-Dadah, O. (2021). Ankle injuries in athletes: A review of the literature. *World Journal of Meta-Analysis*, 9(2), pp. 128–138.

Jamwal, P.K., Hussain, S. & Xie, S.Q. (2015). Review on design and control aspects of ankle rehabilitation robots. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 10(2), pp. 93–101.

Liu, G., Gao, J., Yue, H., Zhang, X. & Lu, G. (2006). Design and kinematics simulation of parallel robots for ankle rehabilitation. In: *Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, China, pp. 1109–1113.

Mattacola, C.G. & Dwyer, M.K. (2002). Rehabilitation of the ankle after acute sprain or chronic instability. *Journal of Athletic Training*, 37(4), pp. 413–429.

Michmizos, K.P., Rossi, S., Castelli, E., Cappa, P. & Krebs, H.I. (2015). Robot-aided neurorehabilitation: A pediatric robot for ankle rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(6), pp. 1056–1067.

Patané, F. & Cappa, P. (2011). A 3-DOF parallel robot with spherical motion for the rehabilitation and evaluation of balance performance. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 19(2), pp. 157–166.

Salter, R.B. (1989). The biologic concept of continuous passive motion of synovial joints: The first 18 years of basic research and its clinical application. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 242, pp. 12–25.

Saglia, J.A., Tsagarakis, N.G., Dai, J.S. & Caldwell, D.G. (2013). Control strategies for patient-assisted training using the ankle rehabilitation robot (ARBOT). *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(6), pp. 1799–1808.

Syrseloudis, C.E. & Emiris, I.Z. (2008). A parallel robot for ankle rehabilitation – evaluation and its design specifications. In: *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*, Athens, Greece, pp. 1–6.

Vallés, M., Cazalilla, J., Valera, Á., Mata, V., Page, Á. & Díaz-Rodríguez, M. (2017). A 3-PRS parallel manipulator for ankle rehabilitation: Towards a low-cost robotic rehabilitation. *Robotica*, 35(10), pp. 1939–1957.

Vér, C., Hofgárt, G., Menyhárt, L., Kardos, L. & Csiba, L. (2015). Ankle-foot continuous passive motion device for mobilization of acute stroke patients. *Open Journal of Therapy and Rehabilitation*, 3(2), pp. 23–34.

Wang, J., Wen, W., et al. (2019). Wearable ankle robots in post-stroke rehabilitation of gait: A systematic review. *Frontiers in Neurorobotics*, 13, p. 63.

Yoon, J., Ryu, J. & Lim, K.-B. (2006). Reconfigurable ankle rehabilitation robot for various exercises. *Journal of Robotic Systems*, 22(S1), pp. S15–S33.

Zhang, M., Davies, T.C. & Xie, S. (2013). Effectiveness of robot-assisted therapy on ankle rehabilitation – a systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10, p. 30.

Zhang, M., McDaid, A., Veale, A.J., Peng, Y. & Xie, S.Q. (2019). Adaptive trajectory tracking control of a parallel ankle rehabilitation robot with joint-space force distribution. *IEEE Access*, 7, pp. 85812–85820.

Development of a Multifunctional Wheelchair to Support Patient Transfer and Rehabilitation

Ventura Martínez Yesica*, Jiménez González Gerardo*, Santiago Rojas Viviana Alondra*, Cruz Raymundo María Isabel*, Castillo Quiroz Gregorio*

**Tecnológico Nacional de México/ I.T.S. Huauchinango, Av. 5 de Octubre, Huauchinango Puebla*

(e-mail: j23312187@huauchinango.tecnm.mx , j21312098@huauchinango.tecnm.mx , j23312177@huauchinango.tecnm.mx , j23312178@huauchinango.tecnm.mx , gregorio.cq@huauchinango.tecnm.mx)

Abstract: :The design of the multifunctional wheelchair for support in patient transfer and rehabilitation was conceived to improve the quality of life of people who suffer from a motor disability or some other pathology that limits their motor autonomy. The main objective is to streamline the tasks that users perform daily, in a rehabilitation center or at home. It is also important to mention that it is also of great help to the healthcare personnel in charge of users in rehabilitation. The multifunctional wheelchair helps reduce the physical burden on physical therapists when performing rehabilitation exercises with the patient or simply transferring them to a stretcher, to the bathroom, or some other place in the rehabilitation center. The chair is developed from recycled, environmentally friendly materials, but above all, the comfort of the users was considered. The design uses worm gear mechanisms that allow the chair to convert into a stretcher with a single movement, this way the healthcare personnel does not apply excessive effort in transferring from the wheelchair to the assigned stretcher. Among the materials are motors, a joystick, rechargeable batteries, and wheels, just to name a few. During the analysis of the prototype's design, important aspects were noted that must be taken into account when working with health tools. Because they are for vulnerable users, it is important to consider a minimum margin of error, cover most of their needs, and, above all, be easy to use and affordable so that their acquisition is not limited to those with greater financial resources. No less important is the consideration of each user's different pathologies and the need to address their general needs.

Keywords: Technology, Prototype, Motor autonomy, Innovation

1. INTRODUCCIÓN

En México, la demanda de servicio de rehabilitación física supera la capacidad de atención mayor, esta situación llega a complicar el hecho de que más de 20 millones de personas viven con alguna discapacidad y de ellas la mitad reportan dificultades severas para poder caminar o moverse (INEGI, 2020). La solución más común para la movilidad son las sillas de ruedas convencionales, las cuales sabemos que tienen funciones fundamentales, pero también presentan limitaciones considerables (Smith et al., 2021). En el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de sillas como las plegables, de transferencia o incluso modelos más especializados que permiten la bipedestación (Ortopedia Integral, 2022).

Es por eso que de estas opciones de sillas con funciones asistidas, como las de caminar sobre sus piernas, llegan a funcionar mejor para objetivos específicos de la rehabilitación. Sin embargo, la principal limitación es que estos no integran múltiples funciones y el costo suele ser muy elevado por lo cual no es fácil la obtención de estos, además de no estar diseñadas para facilitar la labor del fisioterapeuta en tareas críticas como la transferencia segura del paciente a una camilla.

Debido a esto se obliga al personal de salud, que en su mayoría son mujeres, a realizar esfuerzos físicos manuales que incrementan el riesgo de lesiones músculo-esqueléticas y además se reduce la eficiencia del proceso de rehabilitación (OMS, 2021).

Este proyecto tiene como objetivo innovar una silla de ruedas para que sea multifuncional que combine la reclinación, elevación a la altura de una camilla y asistencia para poder ponerse de pie y caminar, además se plantea utilizar materiales reciclables de alta resistencia. Se espera que en este desarrollo no solo mejore la autonomía del paciente, sino que también facilite el trabajo del personal de salud, haciendo que los procesos de transferencia y rehabilitación sean más seguros, eficientes y cómodos para ambos. (Muñoz et al., 2024).

1.1 Antecedentes.

En la sociedad moderna la tecnología se ha convertido en una herramienta eficaz en la vida cotidiana. Las opiniones se dividen, puesto que algunos temen que remplace a los humanos en ciertas tareas cambiando así la forma en que interactúan día a día. Sin embargo, también tiene impactos

positivos en varios ámbitos, un claro ejemplo es la evolución de las sillas de ruedas que se ha convertido en un componente vital en la vida de miles de personas que sufren de alguna discapacidad motriz, gracias a las evoluciones tecnológicas que se han implementado es posible satisfacer una amplia variedad de necesidades tanto del usuario. Desafortunadamente no todos los centros de rehabilitación o pacientes cuentan con el presupuesto para tienen adquirir herramientas con grandes avances tecnológicos, Por ese motivo algunas empresas que se dedican a la fabricación de sillas de ruedas han desarrollado tecnologías más accesibles que compensan los costos elevados que imposibilitan adquiere las sillas. Por estos motivos algunas organizaciones como la Fundación Carlos Slim en conjunto con la Fundación Telmex-Telcel crearon programas de intervención en salud con el objetivo mejorar las condiciones de vida e incorporarlos a la sociedad con capacidades diferentes pero con las mismas oportunidades (Fundación Carlos Slim,2020).Es importante mencionar que la empresa Wheel bock han demostrado un compromiso con la inclusión haciendo uso de la ingeniería mecatrónica, sus diseños e innovaciones se adaptan a las necesidades de los usuarios, implementando iniciativas tecnológicas con enfoques personalizados y económicos según la Revista de OMPI (Organización Mundial de la propiedad intelectual). Por esta razón, el presente trabajo tuvo como objetivo analizar los avances tecnológicos en herramientas, sobre todo en sillas de ruedas que se enfocan en cubrir las necesidades de usuarios con discapacidad motriz y centros de rehabilitación que requieran este tipo de herramientas. De esto se deduce que existe un gran reconocimiento en la importancia del uso de sillas de ruedas como una herramienta que permite la autonomía e inclusión de movilidad, así mismo resaltamos que empresas y organizaciones impulsan la inclusión y oportunidades sin fines de lucro (Wheelchair Fundation, 2023). Av. Tec.

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio del problema se siguió una serie de pasos ordenados cronológicamente, el primero se basó en la observación directa del problema, con el apoyo de cuestionario se realizó una serie de 10 preguntas dirigidas al Centro de Rehabilitación Integral de Huauchinango con el fin de conocer más a fondo las problemáticas que enfrentan día a día el personal de salud y los pacientes. Con base a las respuestas obtenidas se analizaron los datos para poder identificar las principales carencias de los dispositivos tradicionales. Después del análisis realizado en conjunto con Ingenieros docentes expertos en el área de automatización y manufactura se llegó a la conclusión de que las principales causas de carencias es la falta de mecanismos de apoyo para la transferencia o rehabilitación del paciente. Una vez obtenido el resultado del análisis se da paso a los requerimientos funcionales y técnicos que se deben implementar en una silla de ruedas básica para transformarla en una silla de ruedas multifuncional.

Antes de comenzar con el diseño del prototipo en una herramienta CAD, se realizó un boceto burdo del diseño propuesto, posteriormente la idea se llevó a un diseño técnico, con simulaciones para verificar posibles errores o requerimiento de mejoras en el diseño.

A continuación, se presenta el diagrama de proceso (Figura 1) empleados para la recopilación de datos.

Figura 1 Desing thinking.

En el desarrollo de la silla multifuncional se llevará a cabo la metodología de Desing Thinking (Figura 2), el cual es un enfoque que se centra en el usuario para combinar la investigación cualitativa y cuantitativa. Se divide en las siguientes fases:

Figura 2 Diagrama Desing Thinking.

Descripción detallada de la metodología Desing Thinking.

Fases

1.- Empatizar

- Observación: las visitas a centros de rehabilitación (CRIH) ayuda a comprender cuáles son los desafíos diarios de los usuarios y personal.
- Entrevistar: se llevó a cabo una plática con la coordinadora de los fisioterapeutas qué nos proporcionó información acerca de las necesidades y sugerencias acerca de este.
- Investigación documental: revisión acerca de modelos existentes para identificar las mejoras tecnológicas.

2.- Definir

- Recopilación de información: de los datos obtenidos realizar un análisis.

- Planteamiento del problema: limitación de transferencia en pacientes y lesiones en el personal de salud.
- Propuesta de solución: crear una silla multifuncional con todos los requerimientos necesario.

3.- Idear

- Brainstorming: para encontrar soluciones innovadoras se deben hacer sesiones creativas.
- Sketching y diagramas: crear bocetos en los cuales se obtenga una visualización mejor acerca de la funcionalidad de los mecanismos y al mismo tiempo generar diagramas.
- Modelos conceptuales: en software desarrollar un modelo 3D para para un conocimiento más viable.

4.- Prototipar

- Prototipo funcional: permite ver las características acerca de la silla con información mejor controlada.

5.- Validación

- Pruebas de usuario: se invita a fisioterapeutas y a pacientes para la revisión de la comodidad y fácil manejo.
- Efectividad: la estabilidad y la eficiencia energética son revisadas para saber su funcionalidad.

6.- Implementar

- Integración en la vida real: poner el prototipo en un ambiente clínico y observar.
- Recopilación de opiniones: obtener la información para unas mejoras futuras.

Cabe mencionar que para el estudio se emplearon entrevistas con el personal y pacientes del CRIH (Centro de Rehabilitación Integral de Huauchinango) esta herramienta permito a recopilar información importante. Durante la etapa de Idear se emplearon hojas impresas para la elaboración del diseño a mano alzada, esto permitió visualizar mejor la idea del prototipo. Para el análisis de materiales y costos se utilizó el software Excel. Finamente el diseño técnico se desarrolló en SolidWorks, el cual permite modelar el diseño creado en 3D.

Tabla 2. Dispositivos utilizados.

DIAPOSITIVOS ELECTRONICOS.	ESPECIFICACIONES.
1. Computadora portátil.	Asus Tuf Gaming F15
2. Computadora portátil	DELL intel core ¡7
3. Telefono Celular	OPPO A78

4. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Actualmente el proyecto de la silla de ruedas multifuncional se encuentra en la etapa de diseño como se muestra en la (Figura 3) contando con el esqueleto de la estructura, su modelación utilizando SolidWorks, este software permite llevar un diseño burdo a un diseño 3D, permitiendo crear modelos precisos de piezas o ensamble como las ruedas (Figura 5) y el reposabrazos (Figura 7), la herramienta ha facilitado modificar el diseño cada vez que se considere necesario.

El diseño busca implementar soluciones innovadoras a partir de modelos existentes que ayuden en la transferencia segura del paciente en rehabilitación. Actualmente ya se evaluaron opciones de materiales para el desarrollo de la silla de ruedas multifuncional, se hizo una selección detallada de materiales que garanticen comodidad, resistencia facilidad de su uso.

Se busca mejorar la calidad de vida de los pacientes, que permita su autonomía y de la misma forma que facilite las tareas del personal de salud pero que sobre todo responda a las necesidades específicas del entorno clínico y domiciliar dando soluciones prácticas. Brindando comodidad con un respaldo más eficaz para el paciente (Figura 8).

El diseño cuenta con tres funciones importantes, como la problemática radica en usuarios con movilidad reducida, la silla de ruedas tiene la capacidad de transformarse en una silla reclinable pareciendo una camilla con la movilidad claro está de ejemplo en la (Figura 4) donde se muestra el cómo puede reclinarse, de esta manera se puede trasladar a los usuarios a una camilla asignada. Es importante mencionar que la silla de ruedas cuenta con motores de 24 v (Figura 6), esto la hace aún más eficiente ya que facilita transado y minimiza el esfuerzo físico del personal de salud y la comodidad del usuario. Además de que esta se convierte en camilla a una altura estándar.

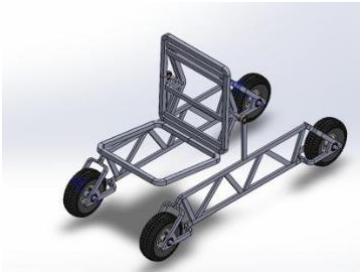


Figura 3 Diseño del esqueleto de la silla de ruedas.

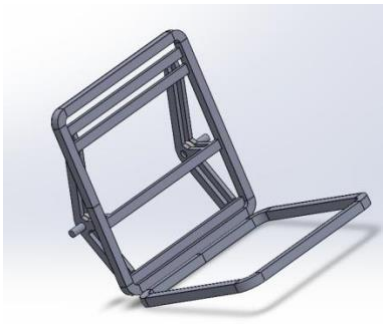


Figura 4 Diseño parte reclinable de la silla de ruedas.

Figura 5 Diseño de las ruedas.

Figura 6 Batería recargable 24v.

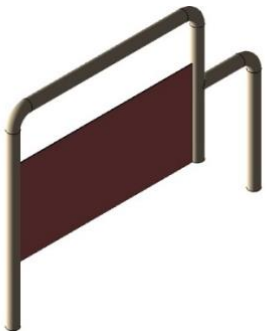


Figura 7 Reposabrazos

Figura 8 Respaldo

5. CONCLUSIONES

El proyecto se encuentra en su etapa inicial, ha tenido avances significativos en el diseño de la silla de ruedas en 3D con el programa SolidWorks ya que permite una mejor visualización del prototipo, de esta manera se facilitará la selección de diseño y materiales adecuados para llevar a cabo la construcción en físico. En esta etapa se presentan los hallazgos más relevantes de la primera fase del proyecto permitiendo tener un prototipo virtual valido que cumple con las condiciones requeridas desde el principio del planteamiento del problema.

La siguiente fase se puede considerar como la más importante, se enfoca en el desarrollo del prototipo en físico, ha esta etapa se le invertirá mayor tiempo que las otras debido a que la elaboración y ensamble dependerá el funcionamiento del prototipo. Una vez llegando a la etapa final, posteriormente se realizarán pruebas con el prototipo para corroborar que el proyecto cubre la alta gama de necesidades de los usuarios, especialmente en la comodidad, el acceso fácil y la seguridad.

Claro está que es importante el que se señale que al estar el proyecto en la fase de modelo virtual (CAD), está pendiente la validación de pruebas de la carga estática y dinámica, la evaluación sobre la durabilidad de los materiales para realizarse en la fase de construcción física. Una de las fases criticas será la de construcción física.
Se incluirán rigurosamente unas pruebas de validación de seguridad cómo pueden ser unas pruebas de estabilidad lateral y frontal que sigan las normativas internacionales (ISO 7176) y algunas pruebas de funcionalidad con los fisioterapeutas y pacientes simulados para medir esta eficiencia sobre la transferencia y su esfuerzo físico requerido. Los resultados serán cruciales para poder evidenciar el avance práctico de este proyecto y su impacto en el entorno clínico

REFERENCIAS

Bravo, A. G., (2017). Diseño mecatrónico y simulación de una silla de ruedas multifuncional para niños entre 6 a 12 años. Master's thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Cantillo Murcia, J. A., (2015). Inclusión y exclusión desde mi silla de ruedas. Paideia Surcolombiana [en línea]. 1(20), 61.

Martínez Pabón, L. D. y Hernández Ángel, V. A., (2017). Representaciones Sociales De La Silla De Ruedas Para La Persona Con Lesion Medular. Revista Colombiana de Rehabilitación [en línea]. 12(1), 96.

Ríos Rincón, A. M., (2001). Modelo automatizado para prescripción del sistema de silla de ruedas "MAPSI". Revista Ocupación Humana [en línea]. 9(1), 72–93.

Electronic Radioactive Source Simulator as a Tool for Teaching Nuclear Physics

Georgina Hernández Santiz*, Adriana Jackeline Hernández Carbajal*, Abigail Peláez Segura*, Christian Roberto Ibáñez Nangüelú*

**Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla Gutiérrez, CP. 29150.*

(e-mail: {203340,231028,231059,cribn}@ib.upchiapas.edu.mx)

Abstract: Teaching nuclear physics, especially the idea of radioactive decay, often faces challenges related to logistics and safety when using real radioactive sources. While software simulations provide a safe alternative, they often lack the tactile component that helps students develop a deeper conceptual grasp. To address this issue, this paper describes the design, construction, and use of a low-cost electronic simulator that creates a physical model of radioactive decay. At the heart of the simulator is a Raspberry Pi Pico microcontroller that accurately controls the brightness of a high-power LED using Pulse Width Modulation (PWM). The LED's brightness is programmed to lower based on the exponential decay law, simulating the behavior of a radioactive source. A BH1750 digital light sensor measures this diminishing light intensity, functioning as a "detector." All parts are enclosed in a custom-designed, 3D-printed case to maintain a controlled optical environment. A user-friendly graphical interface, created in Python with the PyQt5 framework, acts as the control and data collection center. The interface lets users choose from a list of predefined isotopes, such as Technetium-99m and Cobalt-60, to start a simulation based on the corresponding decay constant. The GUI shows both the theoretical decay curve and real-time experimental data, offering immediate visual feedback. Additionally, users can export all collected data in CSV format, allowing students to conduct post-experimental analysis, like calculating the half-life. This integrated system provides a safe, engaging, and educational experience that makes an abstract concept clear and introduces students to important skills in electronic instrumentation and data analysis. Keywords: Radioactive Decay, Electronic Simulator, STEM Education, Raspberry Pi Pico, Data Acquisition.

1. INTRODUCCIÓN

Enseñar conceptos de física nuclear, como el decaimiento radiactivo, puede ser un verdadero desafío tanto pedagógico como logístico. Aunque usar fuentes radiactivas reales es el método más directo, su uso en el aula está muy limitado debido a su alto costo, la necesidad de infraestructura especializada y los estrictos protocolos de seguridad. Esto significa que los estudiantes a menudo se pierden de una experiencia experimental clave que les ayudaría a entender mejor la naturaleza estocástica y exponencial de los fenómenos nucleares.

Para sortear estas dificultades, las simulaciones basadas en software han ganado popularidad. Herramientas como las Simulaciones Interactivas PhET ofrecen un entorno virtual seguro para el aprendizaje. Sin embargo, su principal desventaja es que carecen de interacción física. La literatura sobre pedagogía científica resalta cada vez más la importancia del aprendizaje práctico. Varios estudios indican que manipular equipos reales y obtener datos tangibles lleva a una comprensión más profunda en comparación con los laboratorios que son solo virtuales (Zhou & Wang, 2021). Como señala Lowe (2020), el proceso de ensamblar, calibrar y resolver problemas con instrumentos desarrolla habilidades cruciales en la formación científica que se pierden al usar una interfaz de "caja negra".

Con el objetivo de conectar el mundo digital con la experimentación tangible, ha surgido una creciente tendencia hacia el desarrollo de hardware de bajo costo para la enseñanza de la física (García-Tandrón & O'Mahony, 2022). La enseñanza de la física moderna, en particular, ha sacado un gran provecho de este enfoque, permitiendo que conceptos abstractos se conviertan en experimentos de laboratorio accesibles y seguros, como lo demuestran Martínez y Velázquez (2022).

Proyectos que utilizan plataformas como Arduino o incluso sensores de dispositivos cotidianos, como los teléfonos inteligentes (Monteiro et al., 2017), han demostrado ser herramientas muy efectivas para enseñar diversos principios físicos. Aunque estos dispositivos representan un gran avance, todavía se enfocan en la detección y, a menudo, necesitan fuentes de calibración, sin abordar el desafío de simular una fuente de decaimiento que sea controlada y segura. La importancia de enseñar estos conceptos es enorme, ya que sus aplicaciones abarcan desde la datación de fósiles hasta la medicina nuclear, donde isótopos como el Tecnecio-99m son esenciales para la investigación, áreas que hoy en día se entrelazan con la inteligencia artificial (Bateman et al., 2019; Chen & Wang, 2020).

Es en este contexto que surge el presente proyecto: un simulador electrónico que imita una fuente radiactiva de manera intrínsecamente segura. A diferencia de los métodos anteriores, nuestro sistema produce una señal análoga mediante un LED cuya intensidad se controla para disminuir de forma exponencial. La "actividad" se mide con un sensor de luz, y todo el sistema es gestionado por un microcontrolador Raspberry Pi Pico. La principal innovación radica en la combinación de este hardware con una interfaz gráfica en Python. Utilizar Python se alinea con las tendencias actuales de emplear lenguajes de alto nivel para el análisis de datos en la física introductoria (López-Pérez & Torres, 2023). Así, el dispositivo no solo enseña el concepto de decaimiento, sino que también introduce a los estudiantes en prácticas de instrumentación y programación.

2. METODOLOGIA

El principio básico del simulador se centra en crear una analogía directa entre el fenómeno del decaimiento radiactivo y un sistema optoelectrónico que está bajo control. El decaimiento radiactivo es un proceso aleatorio que, cuando lo miramos a gran escala, sigue un modelo exponencial que va disminuyendo. Este modelo se basa en principios estadísticos que explican cómo se comporta un gran número de núcleos inestables, tal como lo explican Rivera y Torres (2021) en su estudio sobre la modelación matemática del decaimiento radiactivo. La ley que gobierna este proceso es:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

Donde:

- $A(t)$ es la actividad de la muestra en un tiempo t.
- A_0 es la actividad inicial.
- λ es la constante de decaimiento, característica de cada isótopo.

La derivación y aplicación de esta fórmula es un tema clave en la matemática aplicada a las ciencias exactas (López-Pérez & Torres, 2023). Para replicar este comportamiento, nuestro sistema reemplaza la fuente radiactiva con un LED y

el detector de radiación con un sensor de luz. La actividad (A) se expresa a través de la intensidad lumínica (Lux).

El principio de funcionamiento se basa en programar el microcontrolador para que el LED reduzca gradualmente su intensidad, replicando con precisión el comportamiento exponencial del decaimiento radiactivo. Al comenzar la simulación, el LED brilla con toda su fuerza (A_0), y el microcontrolador recalcula y ajusta su brillo a intervalos regulares para que la luz emitida disminuya exponencialmente, imitando así la "desintegración" de los átomos de la fuente. Este enfoque permite crear una representación física, segura y visual del decaimiento radiactivo, que puede ser medida y analizada con instrumentos electrónicos de bajo costo.

2.2. Implementación de Hardware

El prototipo se construyó utilizando componentes electrónicos de bajo costo y alta disponibilidad.

- Unidad Central de Procesamiento: El núcleo del simulador es un microcontrolador Raspberry Pi Pico H. Su soporte nativo para MicroPython también agiliza el ciclo de desarrollo del firmware (Raspberry Pi Foundation, s. f.).

- Fuente Simulada (Emisor): Para emular la emisión se utiliza un LED de alta intensidad de 10W. El brillo del LED es controlado de forma precisa a través de Modulación por Ancho de Pulso (PWM). La señal PWM del microcontrolador se acopla a una etapa de potencia que consiste en un transistor que a su vez controla un MOSFET de canal N. Esta configuración de driver actúa como un inversor lógico, lo que significa que un ciclo de trabajo del 0% en la señal PWM corresponde a la máxima intensidad del LED, y un ciclo de trabajo del 100% lo apaga. Teniendo en cuenta esta inversión a nivel de hardware, el firmware implementa una fórmula de control PWM = PWM_max * (1 - A(t)), donde A(t) es la actividad teórica. De esta manera, cuando la actividad es máxima, el valor de PWM es mínimo, produciendo el máximo brillo, y viceversa. Este codiseño de hardware y software es fundamental para asegurar que la respuesta física del LED sea directamente proporcional a la actividad simulada del decaimiento.

La "actividad" emitida por el LED es medida por un sensor de luz ambiental BH1750. Este sensor digital fue seleccionado no solo por su alta resolución de 16 bits, sino también por su amplio rango dinámico y, de manera crucial, por su respuesta espectral, que se aproxima a la del ojo humano con una sensibilidad máxima alrededor de los 560 nm. Esta característica asegura que las mediciones de iluminancia sean consistentes y fiables, ya que el sensor es más sensible en la región del espectro visible donde el LED blanco emite la mayor parte de su energía. El sensor se comunica con el Raspberry Pi Pico a través del protocolo I2C, un estándar de comunicación robusto y simple para la transferencia de datos en sistemas embebidos (Ishak & Kumar, 2022).

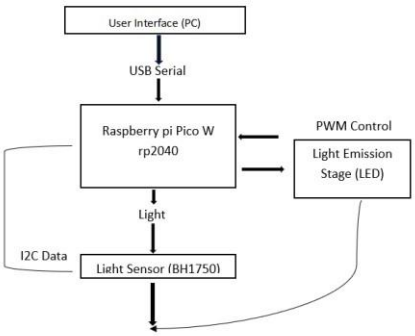


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema electrónico.

2.3 Diseño Físico y Ensamblaje

El circuito se diseñó para ser simple y robusto, utilizando componentes de fácil acceso. En la Figura 3 se muestra el diagrama de conexiones eléctricas, ilustrando la interconexión entre el Raspberry Pi Pico, la etapa de potencia para el LED (compuesta por el transistor y el MOSFET) y el sensor de luz BH1750.

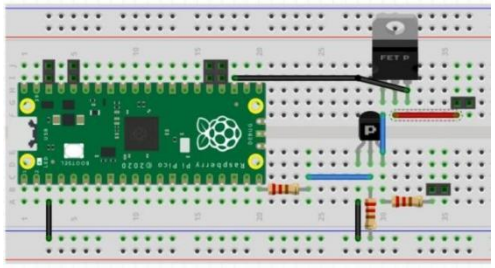


Figura 2. Diagrama de conexiones del circuito electrónico del simulador.

Además, se diseñó y fabricó una carcasa utilizando impresión 3D para alojar todos los componentes. Como se puede ver en la Figura 4, el diseño de la caja tiene dos funciones principales: proteger los componentes electrónicos y, lo más importante, crear un entorno óptico controlado que aísle el sensor de la luz ambiental externa. Esto asegura que las mediciones de intensidad se correspondan únicamente con la luz emitida por el LED.

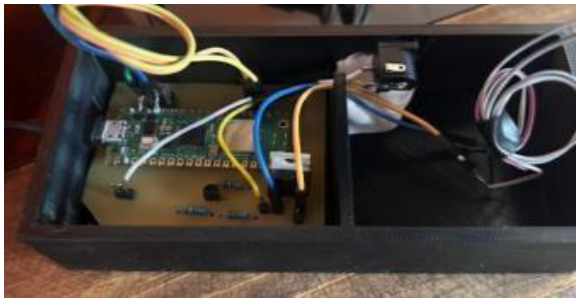


Figura 3. Diseño CAD de la carcasa impresa en 3D para el ensamblaje del prototipo.

2.4 Software y Desarrollo de la Interfaz de Usuario

Se eligió Python 3 por su compatibilidad con el entorno del Raspberry Pi Pico y la facilidad para integrar bibliotecas de visualización como PyQt5. Durante las pruebas iniciales, se ajustó la comunicación serial para evitar pérdidas de datos al adquirir mediciones del sensor BH1750. La interfaz gráfica de usuario (GUI) se desarrolló utilizando el framework PyQt5, una poderosa biblioteca que facilita el diseño de aplicaciones complejas que funcionan en múltiples plataformas. Para visualizar los datos, se integró la biblioteca Matplotlib, que es una de las herramientas más populares en la comunidad científica para crear gráficos estáticos y dinámicos de alta calidad (Caswell et al., 2023). La elección de Matplotlib no fue al azar; su fortaleza radica en su capacidad para ofrecer un control detallado sobre cada aspecto del gráfico, lo que permite crear visualizaciones que cumplen con los estándares de publicación científica. Es importante mencionar que Matplotlib rara vez se utiliza de forma aislada; es parte de un ecosistema más amplio que incluye bibliotecas como NumPy y SciPy, que son el estándar en el cómputo numérico y el análisis de datos en Python, como se detalla en la revisión de Virtanen et al. (2020) sobre estas herramientas. NumPy, por ejemplo, es esencial para manejar eficientemente los arreglos de datos de tiempo y mediciones, mientras que SciPy podría ser útil en futuras expansiones del proyecto para realizar ajustes de curva más avanzados. La comunicación serial entre la aplicación de escritorio y el Raspberry Pi Pico se gestionó a través de la biblioteca PySerial, que ofrece una interfaz simple y confiable para el intercambio de datos a través de puertos COM. Esta biblioteca es fundamental, ya que simplifica las complejidades de la comunicación a bajo nivel, permitiendo al desarrollador

concentrarse en el protocolo de datos: enviar los parámetros del isótopo al Pico y recibir en tiempo real el flujo de mediciones del sensor de luz.

La interfaz de usuario fue diseñada para ser intuitiva, permitiendo al usuario configurar y ejecutar un experimento de decaimiento en pocos clics. Sus componentes principales son:

- Panel de Configuración: Permite al usuario seleccionar el puerto de comunicación serial y elegir el isótopo a simular de una lista desplegable predefinida. La lista incluye varios isótopos con vidas medias muy diferentes, como Tecnecio-99m (6 horas), Yodo-131 (8 días), Cobalto-60 (5.3 años) y Flúor-18 (110 minutos). Al seleccionar un isótopo, el software calcula automáticamente la constante de decaimiento (λ) que se enviará al microcontrolador.

- Visualización de Datos en Tiempo Real: La interfaz cuenta con dos gráficos sincronizados. El primero muestra los datos crudos del sensor (en Lux) en función del tiempo, mientras que el segundo grafica la curva teórica de la actividad (A(t)) calculada por el modelo exponencial. Esto permite al usuario comparar instantáneamente los datos experimentales con el comportamiento teórico esperado.

- Tabla de Datos y Exportación: Todos los datos recibidos (tiempo, valor de PWM, Lux medidos y actividad teórica) se registran en una tabla. Esta funcionalidad no solo permite una supervisión detallada durante el experimento, sino que también ofrece la opción de exportar los datos a un archivo de formato CSV (Valores Separados por Comas). Esto es fundamental para que los estudiantes puedan realizar un análisis post-experimental más profundo utilizando herramientas como Microsoft Excel, Origin o Jupyter Notebooks.

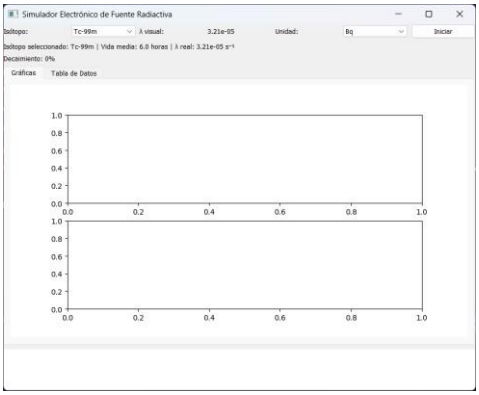


Figura 4. Interfaz del simulador electrónico de fuente radiactiva en el modo de visualización de gráficos antes del inicio de la simulación.

2.5 Flujo de Trabajo Experimental y Adquisición de Datos

El proceso para llevar a cabo una simulación completa es sistemático y está diseñado para ser guiado por la interfaz de usuario. El flujo de trabajo, desde la configuración inicial hasta la obtención de los datos finales, sigue los siguientes pasos:

- Conexión y Configuración Inicial: El primer paso es conectar físicamente el dispositivo simulador a la computadora anfitriona mediante un cable USB. Una vez conectado, el usuario inicia la aplicación de escritorio y selecciona el puerto COM correspondiente al Raspberry Pi Pico en el menú desplegable. A continuación, el usuario elige el isótopo que desea simular de la lista disponible. En este momento, el software calcula internamente la constante de decaimiento (λ) y prepara los parámetros para la simulación sin enviarlos todavía al dispositivo.

- Ejecución de la Simulación: Al presionar el botón "Iniciar", la interfaz envía un comando de inicio al microcontrolador a través de la comunicación serial. Este comando incluye los parámetros calculados para el isótopo seleccionado. El firmware en el Raspberry Pi Pico comienza entonces el bucle principal: en cada paso, calcula el nuevo valor de intensidad para el LED basándose en la ley de decaimiento exponencial y actualiza la señal PWM. Inmediatamente después, toma una lectura del sensor de luz BH1750.

- Adquisición y Visualización en Tiempo Real: El valor de la iluminancia (en Lux) medido por el sensor se envía de vuelta a la aplicación de escritorio a través del puerto serial. La GUI recibe este dato, lo asocia con una marca de tiempo y actualiza de forma inmediata tanto los gráficos como la tabla de datos. Este ciclo se repite a una frecuencia definida, permitiendo al usuario observar en vivo cómo la curva de los datos medidos se va construyendo y cómo se ajusta al modelo teórico.

- Finalización y Exportación de Datos: El usuario puede detener la simulación en cualquier momento. Una vez finalizada, todos los datos recopilados permanecen disponibles en la tabla de la interfaz. El usuario puede entonces utilizar la función "Exportar" para guardar la serie de datos completa (tiempo, Lux, actividad teórica, etc.) en un archivo CSV. Este archivo puede ser fácilmente importado en programas de análisis como Excel, Origin o Jupyter Notebooks para un análisis más detallado, como la linealización de la curva de decaimiento o el cálculo experimental de la vida media.

El resultado final de cada experimento consiste en una serie de datos organizados que se muestran en la tabla de la interfaz gráfica y se pueden exportar a CSV para un análisis más detallado. Entender cada variable es clave para interpretar los resultados. En la Figura 5, puedes ver un ejemplo de cómo se estructura la tabla de datos que genera el simulador.

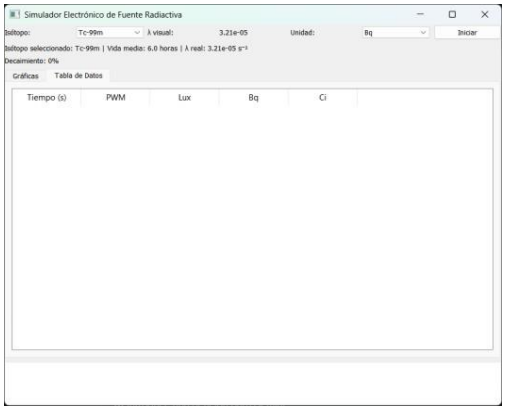


Figura 5. Ejemplo de la tabla de datos del simulador en estado inicial (sin datos registrados aún).

Cada columna de la tabla tiene un significado específico:

- Tiempo (s): Es la marca de tiempo en segundos, contada desde el inicio de la simulación. Es la variable independiente del experimento y sirve como eje horizontal para todas las gráficas de decaimiento.
- PWM: Es el valor digital (sin unidades, de 0 a 65535) que el microcontrolador envía al driver del LED. Representa la "causa" o la señal de control en el sistema. Esta columna es útil para verificar que el firmware está ejecutando correctamente el modelo exponencial.
- Lux: Es la medición cruda de iluminancia recibida del sensor BH1750. Representa el "efecto" o la respuesta física del sistema

a la señal de PWM. Es el dato experimental primario a partir del cual se deriva la actividad.

- Actividad Teórica (Bq): Es el valor de la actividad que debería tener la fuente en ese instante, calculado directamente con la ley de decaimiento. Esta columna permite al estudiante comparar el modelo ideal con la realidad medida.
- Actividad Medida (Ci/Bq): Es el valor más importante para la simulación. Se obtiene al convertir la medición en Lux a unidades de radiactividad estándar, como el Curio (Ci) o el Becquerel (Bq).

Para garantizar que las mediciones sean consistentes y fiables, el módulo del sensor de luz BH1750 y el LED de alta potencia se instalaron en compartimentos dedicados y separados. Esta configuración no solo reduce las posibles interferencias ópticas, sino que también asegura que haya una distancia y alineación constantes entre el emisor y el detector. La ubicación estratégica de estos componentes, que permite que el simulador funcione como una unidad compacta y autónoma, se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Disposición interna del emisor (LED) y el detector (sensor de luz) en compartimentos dedicados.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

La simulación ilustra cómo el isótopo Tc-99m pierde su actividad con el paso del tiempo. En los gráficos, se puede observar claramente cómo la intensidad (Lux) y la actividad (en becquereles) disminuyen gradualmente, siguiendo el patrón típico de un material radiactivo. La vida media de este isótopo es de 6 horas, lo que implica que en ese tiempo su actividad se reduce a la mitad. En resumen, el experimento presenta de manera clara y visual el proceso del decaimiento radiactivo, y los datos simulados se alinean bastante bien con lo que establece la teoría de la figura 7, que es el resultado del isótopo Tc-99m.

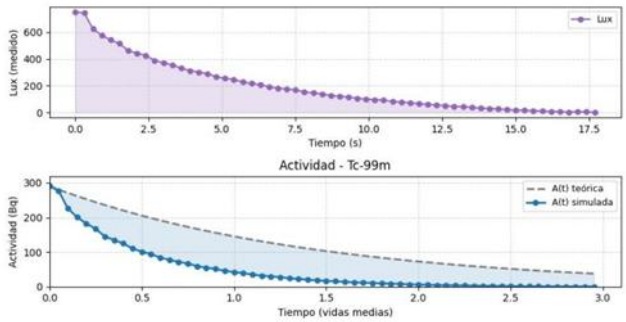
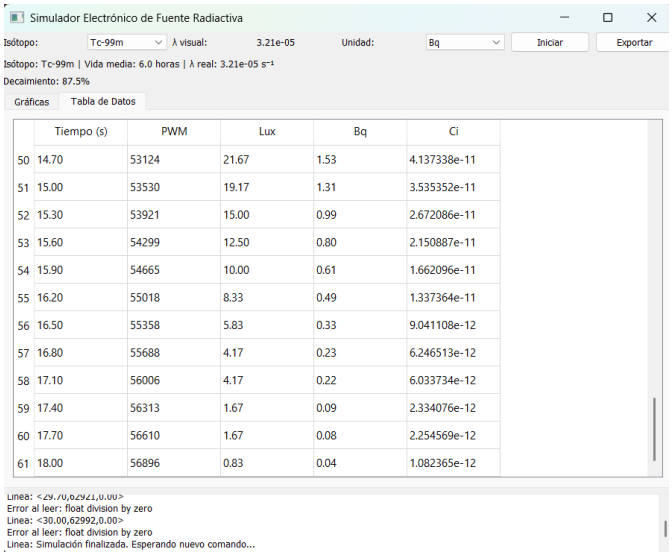


Figura 7. Resultados del isotopo Tc- 99m

En la figura que se presenta a continuación, se pueden ver los resultados obtenidos durante la simulación del decaimiento del isótopo Tecnecio-99m. Se registran los valores que la plataforma genera en tiempo real, mostrando cómo la fuente radiactiva simulada va perdiendo actividad a medida que pasa el tiempo. Cada columna tiene un propósito específico: el tiempo (s) indica cuánto ha transcurrido desde que comenzó la simulación; el PWM representa la señal que el microcontrolador envía al LED para ajustar su brillo; el valor de lux muestra la intensidad luminosa medida por el sensor, que va disminuyendo gradualmente. Finalmente, las columnas Bq y Ci expresan la actividad radiactiva simulada en diferentes unidades (Becquerel y Curie).



	Tiempo (s)	PWM	Lux	Bq	Ci
50	14.70	53124	21.67	1.53	4.137338e-11
51	15.00	53530	19.17	1.31	3.535352e-11
52	15.30	53921	15.00	0.99	2.672086e-11
53	15.60	54299	12.50	0.80	2.150887e-11
54	15.90	54665	10.00	0.61	1.662096e-11
55	16.20	55018	8.33	0.49	1.337364e-11
56	16.50	55358	5.83	0.33	9.041108e-12
57	16.80	55688	4.17	0.23	6.246513e-12
58	17.10	56006	4.17	0.22	6.033734e-12
59	17.40	56313	1.67	0.09	2.334076e-12
60	17.70	56610	1.67	0.08	2.254569e-12
61	18.00	56896	0.83	0.04	1.082365e-12

Figura 8. Tabla de datos del Tc-99m

En la tabla muestra los resultados obtenidos durante la simulación del isotopo Tc-99m el comportamiento se basa en su vida media de 6 horas. En ella se registran los valores de tiempo, señal PWM, intensidad luminosa (Lux) y la actividad radioactiva simulada en Becquereles (Bq) y curis (Ci). A medida que avanza el tiempo, los valores de lux y actividad disminuyen, lo que representa el decaimiento del isotopo.

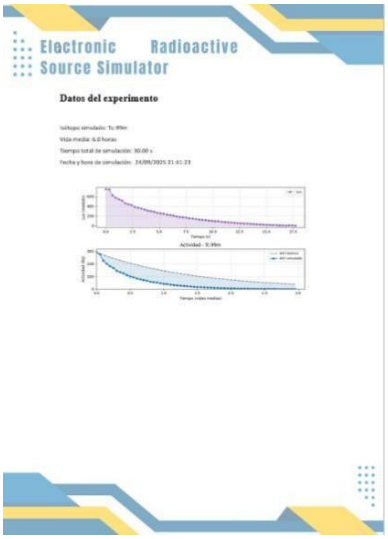


Figura 9. Datos del experimento exportados a la plantilla.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo del simulador electrónico de fuente radioactiva demuestra que es posible enseñar física nuclear de manera segura, económica y experimental significativa**.** La integración de hardware accesible, como el Raspberry Pi Pico y el sensor BH1750, junto con una interfaz de análisis desarrollada en Python, permitió reproducir fielmente el comportamiento del decaimiento radiactivo y ofrecer a los estudiantes una herramienta de aprendizaje interactiva.

Los resultados obtenidos confirman que el dispositivo facilita la comprensión de la ley de decaimiento exponencial y promueve el aprendizaje activo en un entorno controlado. Además, fomenta el desarrollo de competencias en instrumentación, análisis de datos y programación, aspectos fundamentales en la formación científica moderna. El simulador propuesto constituye una alternativa innovadora y reproducible para la enseñanza de la física nuclear. Su diseño accesible permite implementarlo en instituciones con recursos limitados, fortaleciendo el vínculo entre la teoría y la práctica, y contribuyendo a democratizar el aprendizaje experimental en las ciencias físicas.

REFERENCIAS

Bateman, T. M., Heller, G. V., McClellan, J., Cheng, V. Q., Case, J. A., & Slomka, P. J. (2019). Artificial intelligence in nuclear cardiology: Adding value to prognostication. Journal of Nuclear Cardiology, 26(5), 1580–1583. https://doi.org/10.1007/s12350-019-01753-5

Chen, X., & Wang, S. (2020). The role of AI and machine learning in STEM education. Journal of Educational Technology & Society, 23(4), 45–58.

García-Tandrón, J. P., & O'Mahony, J. (2022). Low-cost educational tools for teaching physics and engineering. Sensors, 22(19), Artículo 7545. https://doi.org/10.3390/s22197545

Ishak, M. K., & Kumar, M. P. (2022). Design and implementation of I2C bus protocol on master and slave data transfer based on FPGA. Makara Journal of Technology, 26(1), 30–36. https://doi.org/10.7454/mst.v26i1.1416

López-Pérez, Á., & Torres, C. (2023). Integrating low-cost microcontrollers in STEM education: A hands-on approach to physics learning. Education Sciences, 13(4), 410. https://doi.org/10.3390/educsci13040410

Lowe, T. (2020). The value of hands-on learning in undergraduate physics laboratories. The Physics Teacher, 58(5), 320–323. https://doi.org/10.1119/1.5145415

Martínez, F., & Velázquez, A. (2022). Enseñanza de la física moderna mediante experimentos de laboratorio de bajo costo. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 19(3), Artículo 8917248. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8917248

Monteiro, M., Stari, C., Cabeza, C., & Martí, A. C. (2017). The polarization of light and Malus' law using smartphones. The Physics Teacher, 55(5), 264–266. https://doi.org/10.1119/1.4981030

Raspberry Pi Foundation. (s.f.). Raspberry Pi Pico documentation. https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html

Loker, D. R. (2023). Raspberry Pi Pico as an IoT Device. ASEE Annual Conference & Exposition – Conference Proceedings.

Electronic System for Treating Sarcopenia

Ortiz Flores, Víctor Hugo * **Robles Becerra, Alexis** ** **González Morales, Víctor Alfredo** * **Higuera González, Rogelio Manuel** **

* *TECNM-TESI, Ingeniería Biomédica, Coatepec, Ixtapaluca, 56580. (e-mail: victor.of, victor.gm@ixtapaluca.tecnm.mx).*
** *TECNM-TESI, Ingeniería Electrónica, Coatepec, Ixtapaluca, 56580. (e-mail: alexis.rb, rogelio.hg1@ixtapaluca.tecnm.mx).*

Resumen. Muscle tone disorders, such as sarcopenia and spasticity, represent a significant clinical challenge as they compromise motor function and hinder rehabilitation. Sarcopenia affects about 5 people per 1,000, and in this context, spasticity requires a specific therapeutic approach depending on its type and location. This article proposes the design of a functional electrical stimulation (FES) system for treating spasticity in people aged 70 and over who suffer from lower limb damage. The electrostimulator is designed to change its load depending on the treatment. The circuit analysis, simulation, and experimental tests for the proposed current-based functional electrical stimulation device are shown. This device was designed and implemented with two topologies, i.e., from the study of two different types of electrical circuits. Based on the input voltage values and some elements of each circuit, each approach (analytical, simulation, and experimental testing) provided the output current amplitude values, choosing the circuit or topology for which the latter is a good approximation of the former. From this, the best option for the proposed adaptive electrotherapy device was determined.

Keywords: Sarcopenia, electrostimulator, graphical user interface (GUIDE).

1. INTRODUCCIÓN

La sarcopenia es un trastorno del músculo esquelético progresivo y generalizado que se asocia con una mayor probabilidad de resultados adversos, las estadísticas muestran que las personas mayores de 60 años, la prevalencia oscila entre el 5 % al 10 % de la población en México, de 80 a 90 años alcanza el 15 % al 20 % y para personas mayores a 90 años el porcentaje es de 30 % al 40 % como caídas, fracturas, discapacidad física y mortalidad, ver viva (2007).

En estudios recientes se estiman que el porcentaje de personas que presentan sarcopenia está en torno a un 9.9 % y se incrementa cuando se va avanzando en la edad, ver mayer (2002).

El sistema muscular esquelético a partir de la tercera década de la vida sufre una lenta pero progresiva pérdida de la masa y fuerza muscular, circunstancia que se acentúa a partir de los 65–70 años. A partir de los 50 años la masa muscular disminuye entre un uno a dos por ciento anualmente y la fuerza muscular lo hace entre un 1,5–3 % a partir de los 60 años, ver mayer1 (2002).

La electroestimulación muestra ser una técnica alternativa al ejercicio tradicional para tratar de frenar ese deterioro, por lo que deberán establecerse los protocolos más seguros y eficaces, así como las contraindicaciones (si las hubiera) en su aplicación, ver Sheean (2001).

La electroterapia, es una disciplina de la fisioterapia, se basa en diferentes métodos de aplicación de energía electromagnética al organismo, con el objetivo de generar reacciones bioquímicas y fisiológicas sobre este.

El estimulador nervioso eléctrico transcutáneo (TENS) es un dispositivo de electroterapia que se emplea principalmente en el tratamiento de dolores, ya sean de origen químico, neurálgico o mecánico.

El impacto que se obtiene en un tejido al aplicar electroterapia depende de la intensidad de la corriente, la tensión, la frecuencia, la forma de onda y la duración de la transmisión de la corriente. En función de estas variables, se pueden lograr excelentes resultados terapéuticos al estimular a nivel sensorial, motor o provocar un efecto térmico. Sin embargo, si no se gestionan estas variables, estos resultados pueden ser negativos.

Las repercusiones del flujo de corriente en el organismo pueden provocar desde lesiones físicas secundarias, tetanización, asfixia, quemaduras hasta la fibrilación ventricular. Es crucial destacar que con una intensidad alta se puede provocar fibrilación ventricular sin ningún cambio en la piel, ver Denys (2002).

En la Universidad de Daejeon, Corea, Realizaron un estudio para medir sarcopenia a 10 pacientes, lo realizó colocando un sensor de inercia y medir el ciclo de la marcha, los investigadores utilizaron métodos de inteligencia artificial para obtener los datos estadísticos, la técnica de maquina de soporte vectorial fue el método de mejores resultados, ver Jeong (2021).

Un trabajo de comparación del uso de electromiografía (EMG) solo y otro con realidad virtual fue desarrollado

por investigadores de la Universidad de Yonsei en Korea. 18 niños con sarcopenia fueron objetos de este estudio, durante una semana, las sesiones duraban 30 minutos. El estudio se realizó sobre la extensión del brazo y codo, primero se realizó el estudio con el EMG solo, seguido del EMG con realidad virtual. El uso de EMG con realidad virtual mostro mejores resultados en el equilibrio neuromuscular en el codo, ver Yoo (2014).

En la Universidad de Japón realizaron una revisión científica sobre el uso de electroestimulación en personas con sarcopenia, las estimulaciones de baja frecuencia ayudan en el fortalecimiento del músculo y de alta frecuencia al aumento de la masa muscular, llegaron a la conclusión de que se debería de estimular las fibras musculares tipo II, ver Nishida (2015).

Investigadores de Thayer School of Engineeringd de Estados Unidos de América desarrollaron un dispositivo llamado BandPass, para analizar la fuerza muscular, este dispositivo se conecta mediante Bluetooth para enviar los datos a la computadora, en resultados presenta una eficiencia del 94 %, fue probado en 147 pacientes, ver Suehayla (2021).

En la actualidad, el tratamiento se fundamenta en nutrición, actividad física y, a veces, terapias farmacológicas; sin embargo, estos métodos tienen restricciones vinculadas con la supervisión médica constante, la accesibilidad y la adherencia. Diseñar un sistema electrónico que aborde la sarcopenia; este sistema combina tecnologías de estimulación eléctrica para ayudar a la recuperación y fortalecimiento muscular. Este tipo de sistema tiene la capacidad de brindar una terapia más accesible, individualizada y controlada, lo que favorece al tratamiento tecnológico de enfermedades musculoesqueléticas. Se desarrolló e implementó un sistema electrónico que pueda realizar estimulación eléctrica funcional controlada, enfocado en la rehabilitación y tratamiento muscular de individuos con sarcopenia. El sistema minitorea parámetros fisiológicos y realizó una retroalimentación adaptativa.

2. METODOLOGÍA

En esta sección, se muestra se diseñó e implementó un sistema electrónico para un electroestimulador controlado por corriente. Se presenta el proceso de cada etapa a partir del sistema FES. Además, se muestran dos posibles topologías para determinar la etapa final del electroestimulador. El diagrama de la Fig. 1, muestra el sistema FES propuesto en esta sección. Iniciando por la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés), que se utiliza para la selección y manipulación de la señal de estimulación. Dichos datos se envían de forma inalámbrica a través de un módulo Bluetooth, el cual transfiere la información al microcontrolador.

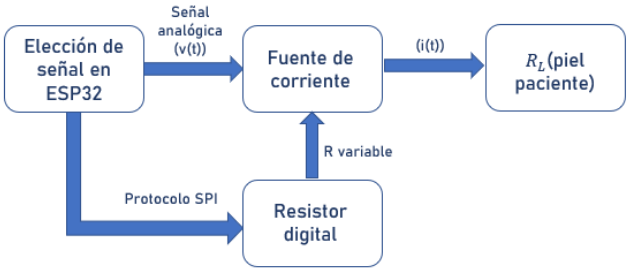


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema FES.

Por medio de instrucciones, el microcontrolador que se emplea para controlar el funcionamiento del sistema FES es el ESP32; el ESP32 envía la señal seleccionada en la GUI al puerto B. El convertidor digital-analógico DAC0808, toma como entrada la señal enviada mediante el puerto B del microcontrolador y la convierte en una señal que varía en el tiempo, es decir, una señal analógica. Al adquirir la señal analógica el convertidor de voltaje a corriente suministra los pulsos de salida a los electrodos de superficie en función al voltaje de entrada. Los potenciómetros digitales, que se encuentran conectados al convertidor de voltaje a corriente, varían las resistencias del circuito (lo que varía la amplitud del pulso de electroestimulación). Este último componente del sistema FES es controlado por el ESP32 a través del protocolo de interfaz periférica en serie (SPI, por sus siglas en inglés).

2.1 Interfaz Gráfica de Usuario

El proceso del sistema empieza mediante la generación de señales de estimulación. Estas fueron obtenidas de un marco de referencia a partir de archivos con extensión *.lvm (del inglés Logical Volume Manager). Es importante que la interfaz tenga un control que sea capaz de operar de forma sencilla. La Interfaz Gráfica de Usuario (Fig. 2), ofrece modificar el tipo de señal o los parámetros de comunicación en serie, además de detener el ciclo.

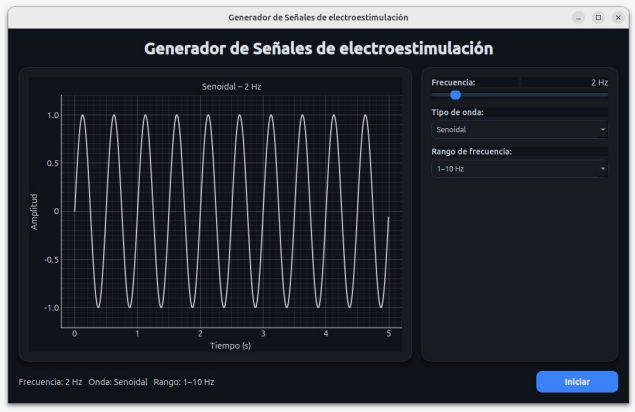


Figura 2. Interfaz Gráfica de Usuario (GUIDE).

La implementación digital del control está basada en el diagrama representado en la Fig. 3, está dividido en tres elementos principales: microcontrolador, puerto serie RS-232 (emula el módulo Bluetooth HC-05) y Convertidor digital-analógico.

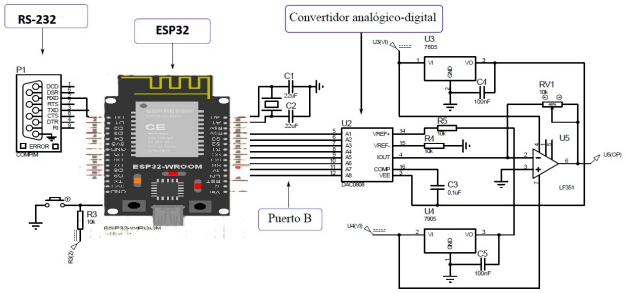


Figura 3. Circuito del sistema de control en Proteus.

La fuente de corriente de Howland es un circuito que utiliza un amplificador diferencial para crear una fuente de corriente controlada por voltaje. Esto se logra al aplicar un voltaje a través de una resistencia en derivación. El amplificador diferencial es un circuito analógico que tiene dos entradas y una salida. Las entradas se denominan entrada inversora y entrada no inversora, y la salida es proporcional a la diferencia entre los dos voltajes de entrada. La fuente de corriente de Howland se diferencia de la fuente de corriente espejo de corriente en que la primera utiliza un solo amplificador operacional, ver Fig. 4 mientras que la segunda utiliza tres.

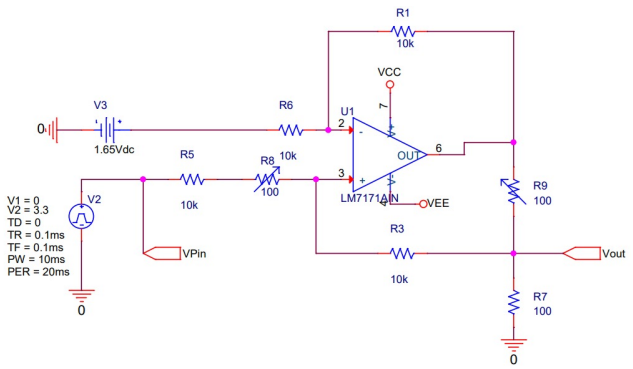


Figura 4. Circuito de una fuente de corriente de Howland diferencial.

La experimentación se describe a continuación:

Universo de 60 pacientes. Distribuidos de la siguiente manera:

- 15 personas mayores masculinos de 70 años, con buena condición física.
- 15 personas mayores femeninos de 70 años, con buena condición física.
- 15 personas mayores masculinos de 70 años, con sarcopenia.
- 15 personas mayores femeninos de 70 años, con sarcopenia.

La experimentación es la siguiente:

- El paciente se sentará en una silla, cuando se le indique se levantará y empezará una caminata sin zapatos realizará la caminata de 10 pasos.
- Cuando el paciente inicie la prueba, empezará a tomar video de la prueba.
- El paciente tendrá un medidor de señales musculares EMG (Electromiógrafo), al realizar la prueba.
- El siguiente procedimiento consiste en realizar el mismo ejercicio ahora el paciente pateará una pelota mientras realiza los 10 pasos.
- El siguiente procedimiento es repetir el paso 1, pero ahora tendrá un electroestimulador en tipo EMS, la frecuencia debe ser de 50 a 100 Hz en personas jóvenes y de 30 Hz en personas mayores, menos de 30 minutos.
- Repetir los pasos 2 al 4.
- Realizar el cuestionario de vida SarQol y medición de rendimiento físico para sarcopenia.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Se pueden observar los métodos de simulación y experimentales utilizados en el sistema FES propuesto en este poster. Se presenta una descripción detallada de las etapas principales del proyecto. Se comienza con la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI), donde se muestra el resultado de la simulación realizada en PYTHON con la gráfica de la señal de salida y el diagrama de bloques en respuesta al tipo de señal que se seleccionó. Después, en la etapa de control, con el osciloscopio digital de la versión DEMO de Proteus, se validó la transferencia de datos en función a la respuesta de la GUI.

Posteriormente, en la etapa de salida, se presentan ambas topologías propuestas en el desarrollo. La primera, muestra las simulaciones en OrCAD Lite y las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de electrónica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca; de la fuente de corriente de Howland diferencial, ver Fig.5.

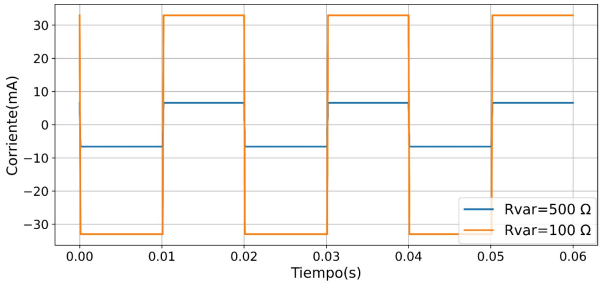


Figura 5. Respuesta del circuito de una fuente de corriente de Howland diferencial.

La Interfaz Gráfica de Usuario, muestra el tipo de estimulación disponible, además de su interpretación gráfica. Tomando como referencia las señales de desarrollo, la GUI cuenta con once opciones de electroestimulación. Para esta sección solo se utilizó como ejemplo la señal de estimulacion rusa. Es importante que la interfaz tenga un control que sea capaz de operar de forma sencilla. La Interfaz Gráfica de Usuario, ofrece modificar el tipo de señal o los parámetros de comunicación en serie, además de detener el ciclo.

A continuación se muestra las pruebas realizadas con el circuito, el paciente con sarcopenia inicialmente debe estar sentado con el circuito, en este caso debe de estar en modo FES (Estimulación Eléctrica Funcional), ver Fig.6.

Figura 7. Paciente antes de la terapia.

Figura 8. Paciente después de la terapia.

Figura 6. Paciente antes de la terapia.

Se realizó la prueba también con un paciente sin sarcopenia, se realizó el mismo procedimiento que el paciente con sarcopenia, ver Fig.7.

El siguiente paso realizado es el paciente debe de ponerse de pie y patear una pelota y registrar el avance con el circuito, el paciente en todo momento esta recibiendo la terapia con el circuito y la GUI, ver Fig.8.

Se repitió el mismo experimento con la persona que no tiene sarcopenia, ver Fig.9.

Después de realizar estas pruebas con el circuito desarrollado, se aplico el cuestionario de vida SarQol y medición de rendimiento físico para sarcopenia.

Figura 9. Paciente después de la terapia.

Al aplicar el cuestionario de Vida SarQol se pudo realizar una comparación entre la rutina normal (RN) y una con electroestimulación (FES), dando los siguientes resultados:

- Ante esfuerzos físicos-ligeros presenta:
  - Dificultad: nunca 41,7 % FES vs 16,3 % RN.
  - Cansancio: nunca 33,3 % FES vs 18,4 % RN.
  - Dolor: nunca 22,2 % FES vs 18,4 % RN.
- Ante esfuerzos físicos-importantes presenta:
  - Dificultad: nunca 19,4 % FES vs 5,6 % RN.
  - Cansancio: nunca 17,5 % FES vs 7,5 % RN.
  - Dolor: nunca 20 % FES vs 7,7 % RN.
- Sensación de ser frágil: No en absoluto 38,2 % FES vs 11,9 % RN.
- Problemas de equilibrio?: No en absoluto 42,9 % FES vs 23,8 % RN.
- Se cae con frecuencia?: No en absoluto 62,9 % FES vs 45,2 % RN.
- Se siente físicamente débil?: No en absoluto 25 % FES vs 19 % RN.
- Sin dificultad para arrodillarse: 31,4 % FES vs 19,5 % RN.

Se percibe una terapia más eficaz con electroestimulación que con una terapia estándar. Para el trabajo futuro y la mejora del sistema, se propone utilizar un sistema de electromiografía e inteligencia artificial para examinar las señales del músculo y crear un circuito cerrado del sistema, lo que permite comprobar una mejoría en el mismo.

4. CONCLUSIONES

El sistema FES propuesto, puede generar formas de onda con una amplitud de 0 a 20 mA y con un ancho de banda de 642.93 kHz. La amplitud de la corriente de salida se puede variar por medio de potenciometros digitales, sin embargo existe un cambio mínimo en la señal, por lo que es recomendable investigar otros potenciómetros con una tolerancia menor de 20 %, a fin de disminuir la variación de la simulación del peor de los casos. Para manipular la forma de onda y ancho de pulso de la señal, el sistema se opera a través de una interfaz gráfica de usuario desarrollada en PYTHON. La comunicación entre la GUI y la etapa de salida se realizó por medio de una ESP32, las pruebas en personas con sarcopenia y

después de aplicar el cuestionario mejoraron un 5 %, para comprobar la efectividad del circuito también se comprobo con personas sin sarcopenia, como trabajo a futuro es desarrollar un sistema con electromiógrafo e inteligencia artificial para lograr una mejor terapia. Este proyecto fue aprobado por el Tecnológico Nacional de México.

REFERENCIAS

Vivancos F., Pascual S., Nardi J., de Miguel-León I., Martínez M., Martínez I., Lanzas G., Garreta R., García P., García M., García V., Bori I., Aguilar M. (2007). Guía del tratamiento integral de la sarcopenia. Rev Neurol 45:365–375.

Mayer H., Esquenazi A., Childers M. (2002). Common patterns of clinical motor dysfunction. In Mayer MH, Simpson DM, eds. Spasticity: etiology, evaluation, management and the role of botulinum toxin. New York: We Move 16–26.

Mayer N. (2002). Clinicophysiologic concepts of spasticity and motor dysfunction in adults with an upper motoneurona lesion. In Mayer MH, Simpson DM, eds. Spasticity: etiology, evaluation, management and the role of botulinum toxin. New York: We Move 1–10.

Sheean G. (2001). Neurophysiology of spasticity. In Barnes MP, Jonson GR, eds. Cambridge: Cambridge University Press 12–78.

Denys P. (2002). Spasticity and spinal cord injury. II Congreso de la Sociedad Española de Neurorrehabilitación. Mesa redonda: Abordaje y tratamiento de la sarcopenia. Barcelona .

Jeong K., Myung B., Kang L., Sang G. (2021). Identification of patients with sarcopenia using gait parameters based on inertial sensors Sensors, 21,.

Yoo J., Lee D., Sim Y., You J., Kim C. (2014). Effects of innovative virtual reality game and EMG biofeedback on neuromotor control in cerebral palsy. Biomed Mater Eng. 24:3613–3618.

Nishida M., Tsuboyama T., Moritani T. y Arai H. (2015). Review of the evidence on the use of electrical muscle stimulation to treat sarcopenia. European Geriatric Medicine. .

Suehayla M., John A., Colin M., Ryan J., Curtis L. (2021). BandPass: A Bluetooth-enabled remote monitoring device for sarcopenia. IEEE Int Conf Commun Workshops. .

Hand Prototype For Catheterization Practice Of Nursing Students

Ochoa Vázquez, Itzel Michelle*, Maldonado León, Rocío Demetria*, Soberanes Martin, Anabelem*

Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Valle de Chalco, 56615. {iochoav001, rmaldonadol003}@alumno.uaemex.mx asoberanesm@uaemex.mx

Abstract: The catheterization process represents a fundamental skill within the best clinical practices that nursing students must master during their professional training. This project aims to support the development of these skills by implementing a prototype that simulates a human hand, specifically designed for practicing this procedure. Using this model allows students to become familiar with the technical steps of catheterization, enhancing their confidence and reducing the margin of error when performing it on real patients. Repetition of the technique using the prototype contributes to the development of muscle memory, which is essential for applying the procedure with precision and safety. The prototype was crafted using silicone to simulate the texture and resistance of human skin, providing a realistic tactile experience. Additionally, copper wires were incorporated to represent veins, which are connected to circuits that detect errors during practice and provide immediate feedback to the student. This feature transforms the model into an interactive learning tool that helps students recognize potential mistakes. The practice environment provided by the prototype is controlled and accessible, making it a viable alternative to commercial simulators, especially for institutions with limited resources. By providing a safe, realistic training space, this project significantly improves the preparation of future nursing professionals, strengthens their clinical competencies, and promotes more efficient, higher-quality healthcare delivery.

Keywords: Catheterization training, Nursing education, Simulation prototype, Clinical skills development, Medical simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La formación en enfermería enfrenta desafíos críticos en la actualidad, destacando la limitada disponibilidad de equipos de simulación avanzados y la persistente brecha entre la formación teórica y las competencias prácticas requeridas en entornos clínicos reales. Estudios recientes evidencian que la incorporación de tecnologías inmersivas, como sistemas hápticos, realidad virtual/aumentada (RV/RA) e inteligencia artificial (IA), mejora significativamente la retención de habilidades clínicas y la toma de decisiones de estudiantes de enfermería (Kuhail et al., 2024; Lelevé et al., 2020). Este método ayuda a simular los procesos clínicos que se experimentan a lo largo de la formación de enfermería, se plantea que el prototipo ayude a que exista mayor práctica mediante simuladores y así evitar poner en riesgo a personas en el transcurso del aprendizaje en la toma de muestras, evitando así causar posible daño a la persona.

Una de las problemáticas identificadas en la formación de los estudiantes de enfermería es la escasez de material didáctico, agravada por dos factores principales: los simuladores disponibles se devalúan con el tiempo, lo que ocasiona fallos en el software y los vuelve inutilizables; aunado a los altos costos de los equipos tradicionales, y en algunos casos, la falta de personalización en el entrenamiento. Esta situación limita el desarrollo de destrezas prácticas y la confianza de los estudiantes, afectando principalmente el aprendizaje de técnicas esenciales como la canalización

Aprender a canalizar una vena en la mano es una de las habilidades esenciales que los estudiantes de enfermería deben dominar desde etapas tempranas de su formación. No se trata solo de insertar un catéter, implica conocer la anatomía, tener precisión en los movimientos y, principalmente confianza para actuar con seguridad frente a un paciente. Sin embargo, muchos estudiantes enfrentan dificultades al practicar esta técnica por primera vez, especialmente cuando no han tenido la oportunidad de entrenar en un entorno seguro y realista.

La canalización venosa periférica es una habilidad esencial en enfermería. Como señalan Remartínez Mallada y Roda Amador (2023) "… su correcta ejecución requiere conocimientos anatómicos, destreza técnica y condiciones de asepsia rigurosas para evitar complicaciones…" (p. 559).

Este proyecto surge desde la observación de una carencia de herramientas accesibles y funcionales, practicar la cateterización de venas en la mano, una habilidad esencial para que los estudiantes de enfermería enfrenten casos reales con mayor seguridad y confianza. Para abordar esta problemática, se diseñó un prototipo de mano con piel simulada, fabricada con silicona fría industrial, que incorpora cables de cobre, los cuales ayudan a la guía sobre la anatomía de las venas que replican la anatomía venosa. Este sistema se integra a un circuito eléctrico, que detecta cuando la aguja conecta con el cobre, indicando de inmediato dando a entender que la técnica un error en la técnica, la retroalimentación instantánea permite al practicante corregir su procedimiento y repetirlo cuantas veces sea necesario. El objetivo de la propuesta es fomentar la repetición para desarrollar la memoria muscular y reducir el margen de error a largo plazo, al mismo tiempo que construye la confianza necesaria a la hora de pasar a la práctica con los pacientes reales.

Se busca que con este prototipo se pierda el miedo y mejorar con cada intento sin dañar la integridad de los practicantes; además, de ser una alternativa económica comparando con los simuladores comerciales, y así lograr el acercamiento a

instituciones con recursos limitados. Según Yusef Contreras, Sanhueza Ríos y Seguel Palma (2021), "La posibilidad de atreverse a interactuar en la resolución de problemas planteados en escenarios de simulación fue indicada como importante, otorgándoles la oportunidad de equivocarse al enfrentar situaciones que habitualmente no están a su alcance y poder practicar, sin provocar daños a terceros ni lesionar su aspecto emocional" (p. 8).

2. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo con el propósito de diseñar una mano didáctica que permita a los estudiantes desarrollar habilidades técnicas para el aprendizaje la de cateterización. Una vez delimitado el tema, se establecieron etapas metodológicas que incluyeron la observación de las técnicas existentes, el diseño de la estructura de la mano, la construcción física del prototipo y las pruebas técnicas correspondientes.

El modelo del prototipo se basó en referencias anatómicas bibliográficas para darle realismo, como se observa en la Fig. 1. Además, su implementación se realizó de manera manual, lo que permitió realizar ajustes y corrección de errores en tiempo real durante el proceso de desarrollo.

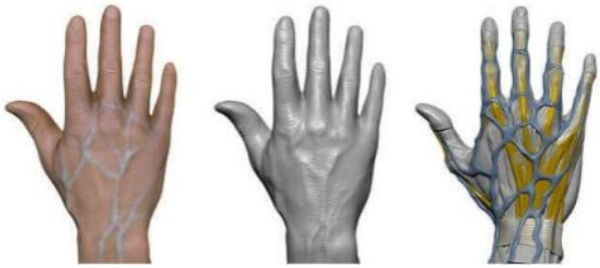


Fig. 1. Anatomía de venas. Fuente: Anatomy for Sculptors, "Mano realista: tendones, venas, grasa y más", https://anatomy4sculptors.com/es/blog/realistic-hand-tendons-veins-fat/

2.1 Enfoque y diseño del estudio

Uno de los principales enfoques surge a partir de la observación de las prácticas que se desarrollan en la especialización de enfermería. El desarrollo de habilidades se aplica directamente en la piel de los practicantes; por lo tanto, existen riesgos a los cuales los estudiantes están expuestos, un ejemplo de ello es la ruptura de la vena, o como se conoce el ponchado de una vena, el cual se llega a observar cuando el estudiante pasa más allá de la vena, lo cual provoca dolor. Otro de los errores comunes es el traspaso de la piel o el mal ángulo en la ejecución. Como señalan Gavilán López et al. (2017), uno de los errores cometidos son los hematomas se define como "extravasación sanguínea en el sitio de punción que aparece durante o después de la colocación del catéter. Debida a la perforación de la vena".

A partir de esas observaciones, surge la necesidad de desarrollar un prototipo, ya que, al estar haciendo dichas prácticas, solo se podía ejecutar la técnica un par de veces antes de causar algún dolor. Por lo tanto, se ideó un diseño del prototipo y sus funciones, haciendo que sea más didáctico a la hora de la práctica, que permita cometer errores en un entorno seguro, sin riesgo para la integridad de las personas. Este prototipo busca cerrar la brecha entre la teoría y la práctica, reduciendo el miedo asociado a este procedimiento básico pero esencial en enfermería. De este modo, los estudiantes pueden desarrollar las competencias necesarias en un ambiente controlado antes de aplicar sus conocimientos en el ámbito clínico real. Como lo sugiere Barrios Araya, Masalán Apip y Cook (2011) "Este aprendizaje automatizado puede proporcionar un ambiente rico para programas interactivos bien diseñados que evalúan la integración del CAL en el plan de estudios. A su vez, ayuda a profesores y a principiantes a apreciar la utilidad de esta metodología en el mundo de la educación en salud" (p. 5.).

El diseño tendrá principalmente un circuito, el cual detectará errores a la hora de insertar la aguja, el cual emitirá una señal para que se logre identificar el error cometido, esto con la posibilidad de realizarlo cuantas veces sea necesario, creando un ambiente de confianza al poder equivocarse y mejorar cada vez más la técnica con la que lo hacen.

2.2 Diseño y construcción del prototipo

Para un primer acercamiento al desarrollo del simulador, se elaboró un prototipo inicial de fabricación artesanal usando silicona industrial como base Fig. 2. Esta elección permitió simular la piel humana, tanto la textura, la resistencia y el grosor, sin especificar inicialmente las características particulares como la edad u otras condiciones fisiológicas. En el interior del prototipo se implementó un circuito que servirá como base para versiones posteriores. El diseño anatómico de las venas principales del dorso de la mano (es decir, solo se tomó para pruebas), aún sin aplicar otras variables vasculares; esto conectado al circuito electrónico, el cual, al tocar la vena (simulando que la llegue a ponchar) de manera incorrecta, prenda un LED que indica el error en la técnica ejecutada. Este mecanismo de retroalimentación inmediata ayudará al estudiante a ajustar su procedimiento y practicar de manera repetitiva con el simulador, facilitando un aprendizaje activo.

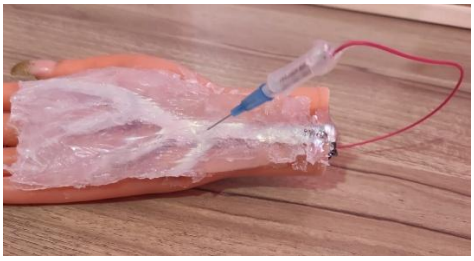


Fig. 2. Primer prototipo. Creación propia.

El sistema fue probado previamente para asegurar su sensibilidad y respuesta ante diferentes tipos de punción. El prototipo fue pensado como una alternativa económica frente a los simuladores comerciales, con materiales accesibles y posibilidad de reutilización. Además, el sistema se conecta a una aplicación que permite a los docentes monitorear el proceso de los estudiantes que practiquen con dicho sistema, este registro será clave para seguir mejorando tanto los estudiantes de enfermería, como el desarrollo del prototipo; esto da paso a que los estudiantes de enfermería logren mayor capacitación en el ámbito de la cateterización.

2.3 Participantes

En esta etapa del proyecto aún no se han realizado pruebas con estudiantes de enfermería ni con usuarios externos. Lo que se ha llevado a cabo hasta ahora son pruebas de funcionalidad del prototipo, enfocadas en verificar que los materiales respondan adecuadamente, que el circuito interno detecte errores como se espera y que el modelo sea resistente y práctico para futuras sesiones de entrenamiento.

Estas pruebas fueron realizadas por el equipo desarrollador, en un entorno controlado, sin participación directa de estudiantes. El objetivo principal fue asegurarse de que el prototipo cumple con los requisitos técnicos básicos antes de ser utilizado en contextos educativos. Por el momento, no se aplicaron criterios de inclusión o exclusión, ya que no se trabajó con población externa. Tampoco se impartieron sesiones prácticas ni se ofreció instrucción formal sobre el uso del modelo.

En una siguiente fase del proyecto se va a incorporar la participación de estudiantes de enfermería, lo que permitirá evaluar el impacto real del prototipo en el aprendizaje de habilidades clínicas, para determinar la tasa de falsos positivos y negativos. Por ahora, el enfoque ha sido validar que el modelo funciona correctamente y está listo para ser aplicado en escenarios formativos.

2.4 Procedimiento de práctica

El proceso de trabajo comenzó con una idea clara: crear un prototipo funcional que permitiera practicar la canalización venosa periférica de forma segura y accesible. A partir de ahí, se fue avanzando paso a paso. Para esto se necesitó visualizar de manera más clara el cómo funcionaba la técnica de cateterización en la mano; al observar la práctica, se llegó a la conclusión de lo que se debía abordar. Llegando a ese punto, se comenzó con el diseño del circuito y de la aplicación para poder avisar a los docentes de los errores que habían cometido los estudiantes y dar seguimiento a los casos extraordinarios.

Una vez identificada la problemática, se desarrolló el prototipo y se realizaron las pruebas de funcionalidad tanto para la punción como para el ángulo, esto con la finalidad de ver el resultado de dicho circuito y la tensión que se llegaba a presentar en la silicona, además de ver la textura y la funcionalidad del circuito, esto solo con el grupo de desarrolladores. Según Botella Dorta (2011), “La punción de la vena se puede hacer mediante dos métodos: el directo (se punciona directamente sobre la vena) y el indirecto (se punciona la zona cercana al vaso y luego dirigimos la aguja hacia el trayecto venoso). Insertaremos la aguja con el bisel hacia arriba, formando un ángulo de 30-40 grados con la piel”.

Una de las características del prototipo es que se puede probar con agujas de distinto calibre, ya que durante la práctica de los estudiantes se visualizó ese detalle; no todos los procedimientos se hacen con el mismo calibre de la aguja, ya que el procedimiento se realiza para bebés, adolescentes, jóvenes/adultos, adultos y personas de la tercera edad. Al ser un prototipo, se definió a un solo modelo sin tomar en consideración los distintos escenarios que pudieran existir.

Durante las pruebas de canalización se pudo implementar el conteo de errores mediante una aplicación, la cual está de libre acceso a los docentes que en ese momento apliquen la práctica, además de poder observar los errores de los demás compañeros en una tabla y así poder retroalimentarlos cada que sea necesario.

Se realizaron pruebas para demostrar la textura y la funcionalidad, si el silicón no impedía que al equivocarse no sonara o no prendiera el LED, a lo cual se demostró que seguía funcionando; además, de hacer distintas pruebas para poder tener lo más acercado a la textura y grosor de la piel, para simular lo más realista el escenario. A pesar de aún no integrar a los estudiantes para las pruebas finales, se ofrecerá una asesoría a los docentes para poder empezar a implementarlo en un ambiente controlado; cabe mencionar que el prototipo cumple con el objetivo principal.

2.5 Recolección y análisis de datos

Durante la investigación, se observó que a medida de la investigación surgían situaciones; una de ellas fue la variabilidad anatómica entre diferentes grupos etarios. Evidenciando notorias diferencias, por ejemplo, entre las venas de un joven/adolescente a las de una persona de tercera edad y las distintas texturas de la piel. Para abordar esta complejidad, se estableció como parámetro de un adulto saludable, lo que permitió simplificar el diseño sin comprometer la funcionalidad esencial del modelo, con ello, se logró no tener mayor complejidad.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

A lo largo de la práctica y del primer acercamiento tanto al tema como al modelo de aprendizaje, se organizó y se determinó que era fundamental ponerlo en práctica, ya que ayudará a los estudiantes de la carrera de enfermería a practicar la técnica de canalización; sin el hecho de lastimarse y al docente a monitorear a los estudiantes para realizar de mejor la práctica del procedimiento. Esta estrategia de enseñanza es adecuada para desarrollar la confianza de los estudiantes, facilitando su transición al campo clínico real; porque se promueve un equilibrio entre lo teórico y lo práctico.

Durante las pruebas, se simuló el procedimiento de canalización venosa periférica en condiciones controladas. Cuando la aguja se desviaba del trayecto venoso simulado, el circuito respondía con una señal clara, lo que confirmó que el mecanismo de retroalimentación estaba funcionando correctamente. También se observó que el modelo se mantenía estable sobre la superficie de trabajo, que la textura era adecuada para practicar y que podía reutilizarse el prototipo sin deteriorarse.

Estos hallazgos dieron confianza, aunque no se cuenta aún con datos pedagógicos ni con la participación de estudiantes, el prototipo demostró ser funcional y prometedor. Coincide con lo que otros autores han señalado: que la práctica repetida en modelos anatómicos mejora la precisión técnica y reduce el riesgo de errores en escenarios reales (Mateo Almudévar et al., 2025; Remartínez Mallada & Roda Amador, 2025).

Una de los aspectos más se valorados fue la posibilidad de equivocarse sin consecuencias negativas. El modelo permite repetir el procedimiento tantas veces como sea necesario, y cada error se convierte en una oportunidad de aprendizaje. Esta retroalimentación inmediata favorece el desarrollo de memoria muscular y ayuda a construir confianza, algo que muchos estudiantes necesitan cuando se enfrentan por primera vez a una técnica invasiva.

4. CONCLUSIONES

Este cercamiento a las distintas áreas es fundamental para el desarrollo de prototipos, el presentar material didáctico que logren utilizar en el área de enfermería y que se logre ocupar para un mayor desarrollo de habilidades y de destreza es necesario, además de contribuir con la sociedad al estar reparando mejor a los enfermeros mediante este tipo de prácticas.

Con este proyecto se ofrece otro punto de vista a la educación del método de cateterización; además de ser menos riesgoso para los estudiantes y los que lleguen a practicar dicha técnica, se hace de manera segura y dándoles oportunidad de equivocarse y corregir. Uno de los objetivos es hacerlo accesible a las personas o instituciones de recursos limitados, esto sin perder calidad para los futuros enfermeros/enfermeras.

Una de las siguientes etapas consistirá en la validación del prototipo con estudiantes, permitiendo la práctica en un entorno controlado donde puedan cometer errores sin consecuencias adversas. Con ello, se podrá obtener información de áreas de mejora tanto para los usuarios como el dispositivo. La base del proyecto es sólida, y se plantea el mejoramiento de la misma para futuros proyectos en el ámbito de Internet de las Cosas (IoT).

REFERENCIAS

Aleova Yusef, V., Sanhueza Ríos, G.A. and Seguel Palma, F.A. (2021). Importancia de la simulación clínica en el desarrollo personal y desempeño del estudiante de enfermería. *Ciencia y Enfermería, 27*. [online] Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95532021000100232

Barrios Araya, S., Patricia Masalán, M. y Paz Cook, M. (2011). Educación en salud: en la búsqueda de metodologías innovadoras, *Ciencia y Enfermería, XVII* (1). 57-69, [online] Disponible en: https://www.scielo.cl/pdf/cienf/v17n1/art_07.pdf

Botella Dorta, C. (2011) *Administración parenteral de medicamentos por vía intravenosa. El goteo intravenoso*. Fisterra. Disponible en: https://www.fisterra.com/ayuda-en-consulta/tecnicas-atencion-primaria/administracion-parenteral-medicamentos-via-intravenosa-el-goteo-intravenoso/.

Kuhail, M. A., Berengueres, J., Taher, F., y Al Kuwaiti, M. (2024). Exploring the Role of Haptic Technology in Healthcare. Advances, Applications and the Future of Haptic Technology, pp. 15-28. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70588-5_2

Lelevé, A., McDaniel, T., y Rossa, C. (2020). Haptic training simulation. *Frontiers in Virtual Reality 1*, 3 (2020). https://doi.org/10.3389/frvir.2020.00003

Mateo Almudévar, C., Almazán Fernández, S., Becerril Marín, A., Biarge Alcubierre, C., Carmona Álvarez, C. and Moreno Apellaniz, N. (2025). Canalización de vía periférica y central: prácticas actuales y consideraciones en enfermería. *Revista Sanitaria de Investigación*, [online] Disponible en: https://revistasanitariadeinvestigacion.com/canalizacion-de-via-periferica-y-central-practicas-actuales-y-consideraciones-en-enfermeria/

Remartínez Mallada, T. E. & Roda Amador, C. M. (2025). Canalización venosa periférica: técnica, indicaciones y complicaciones en la práctica clínica. *Ocronos: Revista Médica y de Enfermería, 8*(7), 559–565. Editorial Científico-Técnica, Zaragoza.

Revista Portales Médicos. (2017). Canalización de vía venosa periférica: cuidados de enfermería. *Revista Portales Médicos.* [online] Disponible en: https://www.revista-portalesmedicos.com/revista-medica/canalizacion-via-venosa-periferica-cuidados-enfermeria/

Manipulation of InMoov-Based Prosthesis by Myoelectrical Signals

Arriaga Criollo Donaldo*, Flores de la Llave Juliette*, Vázquez Ortega Guillermo Antonio*, Vivanco Castañeda Didiher*

** Instituto Tecnológico de Tehuacán, 75770.*
(e-mail: {L21360161, L21360181, L21361202, L21360245 }@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: The loss of an upper limb significantly impacts independence and quality of life, particularly in regions with limited access to advanced prosthetic technology. This research focuses on developing a low-cost myoelectric prosthesis based on the InMoov model, designed under Mexican standards to address technical and accessibility challenges. The project aims to evaluate how prosthesis performance affects user satisfaction, considering factors such as muscle fatigue, signal variability, and environmental noise, which can limit daily use. Insights from this study will inform improvements in control algorithms and promote more accessible, functional devices. EMG signals are recorded with surface electrodes and processed in LabVIEW using algorithms (RMS, MAV, WL, VAR) to classify at least four movements with ≥85% accuracy. An experimental design with a functional prototype integrates EMG acquisition and processing, recognizing four basic muscular movements. Preliminary results show classification accuracy above 85% under controlled conditions. Despite fatigue, rapid recalibration-maintained signal stability, minimized activation errors, and ensured reliable responses with minimal delay. These findings indicate that the proposed system is a technically viable, functional, and accessible solution tailored to patient needs. The inclusion of real-time feedback mechanisms enhances prosthetic adaptability and user control. Overall, the development demonstrates the feasibility of affordable, reliable, and sustainable biomedical technologies that support social and occupational reintegration for amputee patients in Tehuacán and similar contexts.

Keywords: Di prosthesis, electromyographic signals, LabVIEW, dynamic prosthesis, upper limb.

1. INTRODUCCIÓN

La pérdida de una extremidad superior afecta significativamente las actividades cotidianas, las oportunidades laborales y la calidad de vida en general (Zhuang,2025). En México, el acceso a tecnología protésica avanzada sigue siendo limitado debido a los altos costos, la falta de capacitación y las barreras geográficas que dificultan su disponibilidad en zonas semiurbanas y rurales. Tehuacán una ciudad con un interés biomédico emergente, pero con una infraestructura limitada, refleja esta realidad, donde las prótesis convencionales son más accesibles que las alternativas mielecitas.

Las prótesis mioelecticas representan una solución prometedora, ya que utilizan señales electromiograficas de superficie (EMG) para controlar las extremidades artificiales mediante contracciones musculares voluntarias. Estos dispositivos mejoran la capacidad funcional, la independencia del usuario y la reinserción social (Castellini et al., 2014). Sin embargo, persisten desafíos como la adaptación del usuario, la fatiga y la complejidad de la rehabilitación. Estudios previos han demostrado la eficacia del control mieléctrico, pero la mayoría se realizaron en contextos urbanos, lo que deja un vacío en estudios localizados en regiones mexicanas como Tehuacán.

Este estudio se enmarca en la ingeniería de rehabilitación y el procesamiento de señales biomédicas. La investigación se centra en evaluar la capacidad de control de prótesis mioeléctricas en personas con amputación de extremidades superiores, analizando específicamente la influencia de la fatiga muscular y el uso diario en el rendimiento del control. LabVIEW se utiliza como plataforma principal para la adquisición, el procesamiento y el desarrollo de señales, lo que permite un entorno reproducible para la validación experimental.

Este trabajo busca contribuir a la accesibilidad y adaptación de tecnologías protésicas avanzadas en comunidades semiurbanas promoviendo la atención en salud inclusiva y mejorando la calidad de vida de los pacientes de Tehuacán.
El modelo InMoov es un diseño de código abierto desarrollado originalmente por Gaël Langevin, cuyo propósito inicial era la creación de un robot humanoide impreso en 3D. Gracias a su filosofía de código abierto, InMoov se ha convertido en una plataforma ampliamente utilizada para fines educativos, de investigación y de prototipado en robótica y biomecatrónica (Langevin, 2012).

El diseño original de InMoov se concibió principalmente como un prototipo robótico con características estáticas o movimiento limitados. Este proyecto busca transformarlo en una prótesis dinámica y funcional. Para lograrlo, se integrará un sistema de adquisición y procesamiento de señales mioeléctricas mediante el uso del software LabVIEW, donde las señales electromiograficas (EMG) capturadas mediante del muñón del paciente se filtrarán, procesarán y se clasificarán en tiempo real.

El sistema, procesado en LabVIEW, permitirá el reconocimiento de al menos cuatro movimientos básicos con una precisión ≥85 % los cuales estos comandos se enviarán al hardware de control encargado de operar los servomotores del prototipo InMoov. De esta manera, será posible que el prototipo se convierta en una prótesis móvil controlada directamente por la actividad muscular del usuario.

1.1 Subsección

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- Diseñar e implementar algoritmos en LabVIEW capaces de clasificar al menos cuatro movimientos básicos con una precisión ≥85 %.
- Analizar el efecto de la fatiga muscular y el uso prolongado sobre estabilidad de la señal y el rendimiento de la clasificación.
- Evaluar el impacto potencial de esta prótesis en la accesibilidad y las actividades cotidianas en Tehuacán.

2. METODOLOGÍA

La investigación sigue su diseño experimental y analítico. Las señales EMG se adquieren mediante electrodos de superficie colocados en los músculos del muñón de personas con amputaciones de extremidades superiores. Las señales se procesan y clasifican mediante algoritmos desarrollados en LabVIEW, centrándose en la extracción de características (RMS, MAV, WL, VAR, entre otras) y la posterior clasificación del movimiento. (Farrell and Weir, 2007).

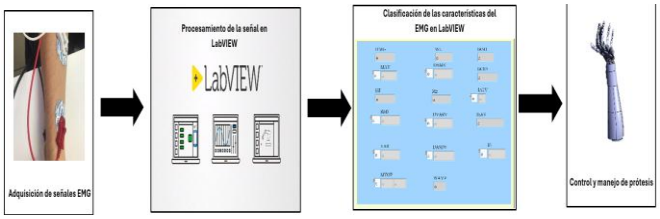


Fig. 1. Diagrama de Funcionamiento de prótesis

En la figura 1 se muestra el diagrama general del funcionamiento del sistema propuesto, donde se observa el proceso completo desde la adquisición de señales EMG mediante electrodos colocados sobre el musculo, seguido por el procesamiento de la señal en LabVIEW, donde se realiza la extracción de características relevantes, hasta la clasificación de los movimientos musculares, Esta información se utiliza para el control y el manejo de una prótesis mioeléctrica.

Para la adquisición de la señal EMG, se usará un sensor EMG MyoWare de la empresa Advancer Technologies el cual permite registrar la actividad eléctrica generada por los músculos esqueléticos cuando realizan algún movimiento. La señal registrada (analógica) puede ser utilizada para controlar diversos dispositivos entre ellos prótesis (NAYLAMP, 2019).

LabVIEW se utiliza como plataforma principal para la adquisición y el procesamiento de las señales gracias a su capacidad para integrar la adquisición de datos en tiempo real el filtrado de señales y el análisis computacional en un entorno intuitivo. La interfaz desarrollada permite la visualización en tiempo real de las señales EMG adquiridas, el ajuste de los parámetros de procesamiento y la observación de la clasificación del movimiento, lo que facilita la validación y optimización de los algoritmos implementados.

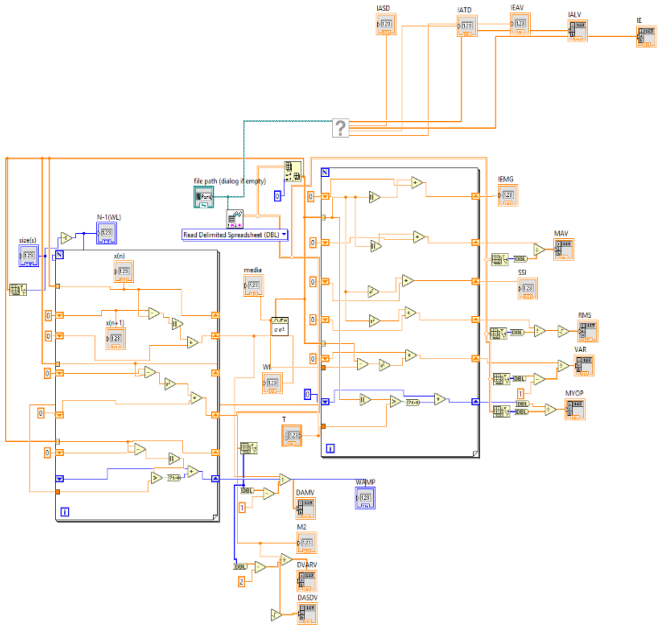


Fig. 2. Interfaz de LabVIEW para adquisición de EMG y extracción de características.

La figura 2 presenta la interfaz de LabVIEW correspondiente al diagrama de bloques del programa desarrollado, en el cual se integran los módulos de configuración, adquisición de señales EMG y procesamiento de datos. Su inclusión tiene como objetivo mostrar de manera clara y visual la estructura funcional del sistema, permitiendo comprender el flujo de información y la interacción entre los distintos componentes que conforman el proceso de análisis mielectrico. Esta representación gráfica facilita la interpretación del entorno de trabajo en LabVIEW, evidenciando cómo se gestionan las señales desde su captura hasta su procesamiento final.

Las señales se procesan y clasifican mediante los algoritmos desarrollados como se muestra en la anterior imagen, los cuales se centran en la extracción de características que permiten identificar patrones de activación muscular. Entre las que buscamos se encuentran el valor cuadrático medio (RMS), el valor absoluto medio (MAV), la longitud de onda (WL) y la varianza (VAR). El RMS representa la energía e intensidad de la señal, la WL describe la variación de la forma de onda, siendo útil para distinguir movimientos más dinámicos o precisos; y la VAR cuantifica la dispersión de la señal respecto a su media, asociándose con la variabilidad de la actividad muscular. Estas características, calculadas dentro de ventanas de tiempo específicas, proporcionan información esencial sobre el comportamiento de la señal y sirven como entrada para los clasificadores que determinan el tipo de movimiento ejecutado, facilitando así el control preciso de una prótesis mioeléctrica (Farrell and Weir, 2007).

Estas características son fundamentales para el funcionamiento de nuestra prótesis mioeléctrica, ya que permiten traducir la actividad eléctrica de los músculos en comandos de control. Ya que procesamos la señales EMG obtenida por nuestros pacientes, y estas características nos proporciona información sobre la intensidad, variación y dinámica del movimiento muscular. Gracias a ellas, los algoritmos previamente configurados nos proporcionan distinguir los distintos patrones de contracción.

Una vez clasificadas las señales electromiográficas (EMG) en LabVIEW, los resultados se utilizan como comando de control para la prótesis mioeléctrica. Cada patrón de activación muscular identificado corresponde a un movimiento especifico de la mano, previamente configurado en el sistema. El flujo de control se basa en la comunicación entre LabVIEW y una placa de Arduino uno, que va a actuar como intermediaria entre el software y los actuadores del prototipo InMoov. LabVIEW le envía a Arduino las señales correspondientes al movimiento detectado.

Arduino interpreta las órdenes y genera las señales necesarias para accionar los servomotores responsables del movimiento de cada articulación. De esta manera, el usuario puede manipular la prótesis en tiempo real mediante contracciones musculares voluntarias, logrando así su manejo.

Para garantizar un diseño completamente personalizado de la prótesis, se implementará tecnología de escaneo 3D. Este procedimiento permite capturar con precisión las dimensiones anatómicas de la extremidad, incluyendo contornos, volúmenes y detalles de la superficie, lo cual es fundamental para lograr un ajuste ergonómico y cómodo. La información obtenida del escaneo sirve de base para el modelado digital de la prótesis, garantizando una interfaz óptima entre el dispositivo y el muñón del paciente, minimizando los puntos de presión y las posibles molestias durante el uso prolongado.

Fig. 3 Escáner 3D Revopoint

En la figura 3 se aprecia un escáner 3D, este fue usado para digitalizar el modelo del muñón de la persona a la cual se hará la adaptación de su prótesis mioeléctrica, este escáner nos permite capturar con precisión la forma y dimensiones necesarias para el diseño de su prótesis.

Los participantes serán seleccionados con base en la evaluación clínica, los criterios de inclusión (amputación de miembro superior, rango de edad de 18 a 60 años y autorización médica) y el consentimiento informado. El estudio abarca tanto zonas rurales como urbanas, principalmente la ciudad de Tehuacán, con el propósito de proporcionar un análisis integral de la accesibilidad y adaptación de las prótesis mioeléctricas. Esta perspectiva comparativa permite identificar variaciones en costos, disponibilidad tecnológica, niveles de capacitación de los usuarios y condiciones de uso en diferentes entornos. Al considerar estas diferencias, se garantiza un enfoque más completo y representativo, lo que fortalece la validez del análisis y facilita la generación de estrategias que optimicen la implementación y adopción de prótesis avanzadas en diversos contextos socioeconómicos y geográficos.

Hasta la fecha, el INEGI no ha publicado datos específicos sobre el número de personas con amputaciones de miembros superiores ni sobre el uso de prótesis en los últimos años (2020-2025). La información más reciente disponible proviene de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) de 2018, que reportó 1,370,000 personas con amputaciones de miembros superiores en México. Sin embargo, no especifica cuántas de estas personas usan prótesis.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados preliminares sugieren que los algoritmos de LabVIEW implementados son capaces de lograr una alta precisión en la clasificación del movimiento en condiciones controladas.

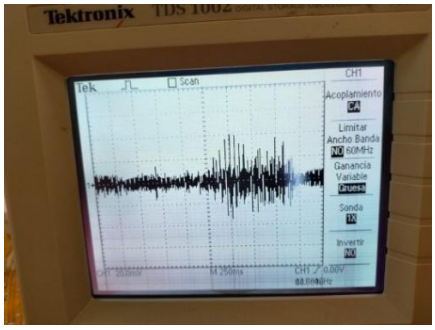


Fig. 4. Señal EMG registrada durante la ejecución del movimiento.

En la Figura 4 se observa la señal EMG adquirida y visualizada en un osciloscopio, donde se aprecia la actividad eléctrica del músculo durante la contracción voluntaria. La señal presenta variaciones características en su amplitud y frecuencia, propias de la naturaleza biopotencial de las señales mioeléctricas. Esta visualización permitió verificar en tiempo real la correcta adquisición de la señal, así como evaluar el nivel de ruido y la estabilidad del registro antes de su procesamiento en LabVIEW. De esta forma, se asegura la validez de los datos obtenidos para el posterior análisis de características y clasificación del movimiento.

El análisis de la fatiga muscular mostró una disminución progresiva de la estabilidad de la señal, especialmente durante tareas repetitivas o prolongadas, lo que resalta la necesidad de implementar protocolos de entrenamiento adaptativos y estrategias de recalibración rápida para mantener la precisión en la clasificación del movimiento. Además, se observó que factores externos, como la variabilidad ambiental y las condiciones de uso diario, afectan la calidad de la señal EMG,

lo que refleja la importancia de considerar el contexto del usuario al diseñar sistemas de control mioeléctrico.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos, pero brindan una visión novedosa dentro del contexto de Tehuacán, donde los factores ambientales y de accesibilidad juegan un papel importante.

Fig.5. Prótesis mioeléctrica impresa en 3D basada en el modelo InMoov.

En la Figura 5 se muestra el prototipo funcional de una prótesis mioeléctrica para miembro superior, el prototipo se fabricó con filamento de fibra de carbono, un material que proporciona resistencia mecánica, ligereza y durabilidad. Gracias al uso de impresoras 3D capaces de procesar este tipo de compuesto, se garantiza la producción de piezas robustas y fiables, aptas para soportar las exigencias del uso diario. La combinación del escaneo y la impresión en fibra de carbono permite el desarrollo de prótesis personalizadas de bajo costo con una mejor distribución de la carga, lo que aumenta la comodidad y reduce la tasa de abandono.

Durante el desarrollo del prototipo se consideraron las Normas Oficiales Mexicanas e Internacionales aplicables a dispositivos médicos y electrónicos, previamente mencionadas. En primer lugar, se aplicaron los lineamientos de la NOM-241-SSA1-2021, que establece las buenas prácticas de fabricación para dispositivos médicos, asegurando la trazabilidad del proceso, la correcta manipulación de materiales y la documentación técnica del diseño, así mismo, se tomaron en cuenta los criterios de la NOM-001-SCFI-2018, referente a los requisitos de seguridad electrónica en dispositivos electrónicos, con el fin de garantizar la protección del usuario y del sistema durante las pruebas experimentales (Diario Oficial de la Federación, 2021) (Diario Oficial de la Federación, 2019).

Normas Oficiales Mexicanas aplicables a las prótesis de miembro superior

NOM-241-SSA1-2021 – Buenas Prácticas de Manufactura para Dispositivos Médicos. Establece requisitos de calidad, seguridad, trazabilidad, esterilidad y control de procesos en la producción de dispositivos médicos.

NOM-050-SCFI-2004 – Información comercial etiquetado general de productos Requiere información clara en el etiquetado de los productos destinados a los consumidores en México.

NOM-001-SCFI-2018 – Dispositivos electrónicos – Requisitos de seguridad eléctrica. Se aplica a prótesis con componentes electrónicos, estableciendo pautas de seguridad eléctrica.

NOM-016-SSA3-2012 – Organización y operación de los servicios de rehabilitación. Regula el entorno clínico en el que se utilizan prótesis, garantizando condiciones de rehabilitación seguras y efectivas.

Normas internacionales complementarias, como:

- ISO 13485 – Gestión de calidad en dispositivos médicos.
- ISO 10993 – Evaluación biológica de materiales médicos (biocompatibilidad).
- ISO 8549-4 – Terminología de prótesis y ortesis.
- ISO 10328 – Requisitos de pruebas para prótesis de extremidades.

4. CONCLUSIONES

La conclusión del proyecto destaca los avances en el diseño y la personalización de prótesis mioeléctricas para miembros superiores. Se desarrolló un prototipo funcional basado en el modelo de código abierto InMoov, controlado mediante una interfaz LabVIEW-Arduino que articula cinco servomotores según la cinemática Denavit-Hartenberg. Además, se aplicó el escaneo 3D del muñón y las piezas impresas, obteniendo mediciones anatómicas precisas sin contacto (≈0,05 mm), garantizando un ajuste óptimo y eliminando la necesidad de moldes físicos.

Como próximos pasos, se planea validar el prototipo con usuarios reales y mejorar sus capacidades mediante sensores mioeléctricos adicionales, algoritmos de procesamiento más robustos (posiblemente con inteligencia artificial) y la exploración de materiales complementarios, como el TPU flexible, para mejorar la comodidad. En resumen, este trabajo sienta las bases para prótesis mioeléctricas accesibles, duraderas y de diseño abierto, con gran potencial en aplicaciones médicas y de rehabilitación.

Para futuras etapas del proyecto se considera la incorporación de normas adicionales que fortalezcan la certificación y seguridad del dispositivo. Entre ellas destacan la NOM-016-SSA3-2012, relacionada con la organización y operación de los servicios de rehabilitación, y la NOM-050-SCFI-2004, referente al etiquetado e información comercial de los productos destinados al consumidor.

Asimismo, se planea aplicar las normas internacionales ISO 10993, que evalúa la biocompatibilidad de los materiales médicos, y ISO 13485, que regula los sistemas de gestión de calidad para dispositivos médicos. La incorporación de estas normas permitirá que el prototipo evolucione de un modelo experimental a un dispositivo clínicamente validado, garantizando seguridad, confiabilidad y cumplimiento con los

estándares internacionales en el campo de la rehabilitación protésica.

REFERENCIAS

Arduino, G. (2012) *InMoov: the first open-source 3D printed life-size robot*.

Castellini, C., Artemiadis, P., Wininger, M., Ajoudani, A., Alimusaj, M., Bicchi, A. and Caputo, B. (2014) 'Proceedings of the IEEE – Advances in Upper Limb Prosthetics Control: State of the Art and Future Challenges', *Proceedings of the IEEE*, 102(14), pp. 1859–1871.

Diario Oficial de la Federación. (2004, 12 de abril). *NOM-050-SCFI-2004, Información comercial – Etiquetado general de productos*. Secretaría de Economía. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691241

Diario Oficial de la Federación. (2011, 16 de diciembre). *NOM-252-SSA1-2011, Salud ambiental – Contenidos máximos permisibles de metales pesados en juguetes*. Secretaría de Salud. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5228774
(⚠ Nota: Aunque esta NOM se usa en ocasiones como referencia de biocompatibilidad, en México la evaluación de biocompatibilidad se complementa con ISO 10993. Si la requieres específicamente para dispositivos médicos, te sugiero aclarar esto en tu protocolo).

Diario Oficial de la Federación. (2012, 19 de noviembre). *NOM-016-SSA3-2012, Organización y funcionamiento de los servicios de rehabilitación*. Secretaría de Salud. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5281045

Diario Oficial de la Federación. (2019, 17 de mayo). *NOM-001-SCFI-2018, Aparatos electrónicos – Requisitos de seguridad eléctrica*. Secretaría de Economía. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5560479

Diario Oficial de la Federación. (2021, 20 de diciembre). *NOM-241-SSA1-2021, Buenas prácticas de fabricación de dispositivos médicos*. Secretaría de Salud. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5638793

Farrell, T.R. and Weir, R.F. (2007) The optimal controller delay for myoelectric prostheses', *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(1), pp.

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 8549-4:2014 – Prosthetics and orthotics — Vocabulary — Part 4: Terms relating to limb amputation*. ISO. https://www.iso.org/standard/60396.html

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 10328:2016 – Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses — Requirements and test methods*. ISO. https://www.iso.org/standard/69357.html

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 13485:2016 – Medical devices — Quality management systems — Requirements for regulatory purposes*. ISO. https://www.iso.org/standard/59752.html

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 10993-1:2018 – Biological evaluation of medical devices — Part 1: Evaluation and testing within a risk management process*. ISO. https://www.iso.org/standard/68936.html

Langevin, G. (2012) *InMoov: Open-Source 3D Printed Humanoid Robot*.

Pizzolato, C., Tagliapietra, L., Cognolato, M., Reggiani, M., Müller, H. and Atzori, M. (2017) 'Comparison of six electromyography acquisition setups on hand movement classification tasks', *PLOS ONE*, 12(10).

Wu, H., Dyson, M. and Nazarpour, K. (2021). Arduino-based myoelectric control: Towards longitudinal study of prosthesis use. *Sensors*, 21(3), 763.

Zhuang, K.Z., Sommer, N., Mendez, V., Aryan, S., Formento, E., D'Anna, E., Artoni, F., Petrini, F., Granata, G., Cannaviello, G., Raffoul, W., Billard, A. and Micera, S. (2025). Shared human-robot proportional control of a dexterous myoelectric prosthesis. *Unpublished manuscript*.

Mechanical Percussion Device for the Prevention of Myofascial Syndrome in the Back in Patients

Barragán Méndez, José María, Reyes Muñoz, María Fernanda, Valerio Aldama, Sinaí

**Instituto Tecnológico de Tehuacán, 75790.*
(L21360163@tehuacan.tecnm.mx, L21360211@tehuacan.tecnm.mx,
L21360240@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: Myofascial syndrome is one of the leading causes of musculoskeletal pain in the adult population, characterized by the presence of trigger points that limit mobility and reduce quality of life. Bedridden patients or those with restricted mobility are at greater risk of developing this condition, particularly in the dorsal region. A sample of 45 participants was assessed using portable ultrasound imaging before and after the intervention. Preliminary results showed an average reduction of 1.06 mm in fascial thickness after 15 minutes of mechanical percussion therapy. This measurable decrease suggests a relaxation of the myofascial tissue, supporting the hypothesis that percussion facilitates myofascial release and reduces muscle stiffness by improving the elasticity and mobility of the dorsal fascia.This work highlights the use of CAD in this work because it would help to simulate without making a previous physical prototype.

Keywords: myofascial syndrome, mechanical percussion, fascial thickness, use of CAD, rehabilitation.

1. INTRODUCCIÓN

El síndrome miofascial (SMF) constituye una de las patologías musculoesqueléticas más frecuentes, con una prevalencia estimada del 30% al 85% en diferentes poblaciones adultas (Parry & Puthucheary, 2015). Se caracteriza por dolor localizado y la presencia de puntos gatillo miofasciales (PGM), definidos como “zonas hiperirritables localizadas dentro de una banda tensa de un músculo esquelético, dolorosas a la compresión y capaces de provocar dolor referido, disfunción motora y fenómenos autonómicos” (Simons et al., 1999). Estos puntos generan limitación funcional y disminuyen la calidad de vida (Simons, 2008). En la región dorsal, este síndrome puede presentarse con alta recurrencia en pacientes sometidos a periodos prolongados de inmovilidad, como aquellos hospitalizados o encamados, condición que incrementa la rigidez muscular y favorece la aparición del dolor crónico.

En la última década, el uso de dispositivos de percusión mecánica ha cobrado relevancia en fisioterapia y rehabilitación. Estudios recientes demuestran que estas herramientas pueden mejorar la circulación local, reducir la tensión muscular y aumentar el rango de movimiento articular (Moyer, 2011; MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), 2023). Ensayos clínicos han reportado beneficios de la terapia de percusión en la fascia toracolumbar, evidenciando disminución de la rigidez y cambios positivos en el grosor fascial medido por ultrasonido (Wilke et al., 2023). Asimismo, comparaciones entre dispositivos de percusión y técnicas manuales de liberación miofascial sugieren que los primeros ofrecen resultados equivalentes o superiores en la reducción del dolor y la mejora funcional (MedPath Trial, 2023).

Los pacientes encamados suelen presentar dolor muscular y rigidez debido a la inmovilidad prolongada, la disminución del flujo sanguíneo y la pérdida de elasticidad de los tejidos. Estas condiciones no solo afectan la calidad de vida, sino que también aumentan el riesgo de complicaciones secundarias y prolongan el tiempo de recuperación. El abordaje convencional suele incluir masajes manuales, movilizaciones pasivas y terapias físicas, las cuales requieren esfuerzo constante del personal de salud y no siempre resultan eficaces en este grupo de pacientes.

Diversos estudios han demostrado que las terapias percutivas pueden generar efectos positivos en el tejido muscular y fascial. Por ejemplo, un ensayo controlado aleatorizado reportó que la aplicación de terapia percutiva en la región lumbar redujo significativamente la sensación de rigidez y mejoró la temperatura cutánea, aunque no modificó el grosor de la fascia en participantes sanos (Wilke et al., 2023). De manera similar, investigaciones en población activa muestran que el uso de dispositivos percutores mejora la flexibilidad de los isquiotibiales y el rango de movimiento tras intervenciones breves (Cheatham et al., 2015; Behm et al., 2022). Además, en

pacientes con osteoartritis de rodilla, la combinación de fisioterapia convencional con percusión muscular resultó en mayor reducción del dolor y mejor funcionalidad en comparación con la fisioterapia sola (Elhakeem et al., 2022). Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se han realizado en personas jóvenes, activas o con patologías musculoesqueléticas específicas, dejando un vacío en la investigación sobre los efectos de la percusión en pacientes encamados, quienes presentan necesidades particulares debido a su inmovilidad prolongada. Por ello, resulta necesario evaluar el uso de un instrumento percutor como una alternativa complementaria, segura y eficiente para disminuir el dolor muscular en esta población vulnerable, con el fin de contribuir a mejorar su confort, reducir la dependencia de analgésicos y optimizar la carga de trabajo del personal de salud.

2. METODOLOGÍA

Se desarrollo un ensayo clínico piloto cuasiexperimental, con diseño pre y post intervención, basado en el protocolo descrito por Wilke et al. (2023). El objetivo es evaluar los efectos inmediatos de la terapia de percusión mecánica sobre la fascia toracolumbar, utilizando ultrasonido portátil para medición estructural.
Se toma una muestra de N=45 voluntarios que se encontraron en la región de Tehuacán Puebla en la cual presenta el diseño de estudio, describiendo los procedimientos empleados para la recopilación y análisis de datos. Se especifican las técnicas utilizadas, los materiales, equipos o software aplicados, así como los criterios de selección de la muestra o población estudiada. En estudios en desarrollo, se incluye la metodología planificada y la justificación de las decisiones tomadas.

2.1 Voluntarios

Los participantes fueron reclutados de forma voluntaria de manera no probabilística en la ciudad de Tehuacán, Puebla. En total, se planea trabajar con aproximadamente 45 participantes, sin restricción específica de sexo ni edad, con la única condición de no presentar lesiones cutáneas abiertas en ninguna región dorsal ni enfermedades graves que contraindiquen la aplicación de terapia mecánica de percusión.

Los criterios de exclusión consideraron: presencia de patologías musculoesqueléticas graves diagnosticadas (por ejemplo, fracturas recientes o infecciones), cirugías de columna en los últimos 6 meses, o cualquier condición que genere dolor agudo que impida la participación.

El protocolo se llevó a cabo bajo la NOM-004-SSA3-2012, resguardando la confidencialidad de los datos personales.

2.2 Equipo y ajustes (recomendación)

Para el experimento se utilizó un ecógrafo portátil con app WirelessKUS (iOS). Sonda lineal de alta frecuencia (ideal 7–12 MHz).

El equipo tuvo unos ajustes aproximados: frecuencia alta (8–12 MHz), profundidad 3–5 cm (según constitución del participante), ganancia adaptada para visualizar claramente las líneas hiperecogénicas de la fascia.

Prototipo mecánico

El prototipo se basa en un mecanismo (Fig. 1) constituido por dos arboles de levas dispuestos estratégicamente para mover los pistones que interactuarán con cada uno de los puntos gatillo ya mencionados anteriormente. El cual propone ejercer puntos de presión de aproximadamente 0.8 cm. para relajar y conseguir romper el ciclo de contracción que se tiene.

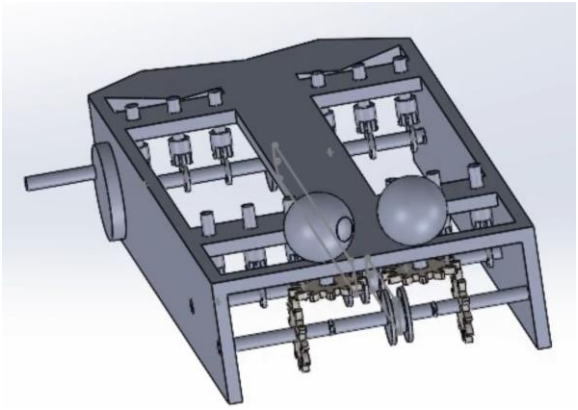


Fig. 1 Diseño CAD en Solidworks que muestra el prototipo del percutor mecánico.

2.3 Cálculo del tamaño de la muestra

Se diseño un ensayo de un solo grupo, con mediciones y post intervención. El principal desenlace fue el cambio de grosor de la fascia toracolumbar antes y después de la aplicación de la terapia de percusión mecánica.

El tamaño de la muestra se calculó utilizando la fórmula para comparación de medias relacionadas (prueba t para muestras pareadas). Los parámetros considerados fueron: nivel de significancia α=0.05, una potencia estadística del 80% (1-β=0.80), una diferencia mínima esperada en el grosor de la fascial de 0.10 cm y una desviación estándar estimada de 0.20 cm.

$$n = \left(\frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}} + Z_{1-\beta}}{\frac{\delta}{\sigma_d}} \right) \quad (1)$$

Donde $Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1.97$, $Z_{1-\beta} = 0.84$, δ =0.10cm y $\sigma_d = 0.20cm$

El cálculo resulto en un tamaño de muestra mínimo de 32 participantes. Considerando una posible tasa de deserción del 10-15%, se determinó necesario reclutar entre 36 y 38 individuos para asegurar la potencia del estudio. Finalmente se decidió trabajar con un total de 45 participantes, con el fin de garantizar robustez en los análisis y compensar posibles variaciones en la desviación estándar real.

2.4 Protocolo de intervención

Los participantes utilizaron ropa cómoda y fueron posicionados en decúbito prono (boca abajo) sobre una camilla

de exploración, con los brazos extendidos a lo largo del tronco en posición de reposo.

La intervención consistió en la aplicación de terapia de percusión mecánica. El procedimiento fue realizado siempre por el mismo investigador, con el fin de garantizar la homogeneidad en la técnica y la presión aplicada.

El protocolo de aplicación fue el siguiente:

Duración total: 15 minutos por participante.

Frecuencia de percusión: aproximadamente 30 Hz, ajustada en el dispositivo, en concordancia con la literatura que indica que este rango es adecuado para la liberación miofascial y la estimulación de los tejidos blandos.

Cabezal de masaje: modelo plano y rígido, diseñado para distribuir uniformemente la presión sobre la fascia dorsal.

Zonas tratadas: el dispositivo fue colocado de manera vertical sobre la piel, recorriendo la trayectoria de los músculos erectores de la columna (desde la región lumbar hasta la región torácica superior).

Técnica de aplicación: se inició el masaje en la porción caudal (zona lumbar), avanzando de forma lineal hacia la región cefálica (cercana a las escápulas). Posteriormente, se realizó un desplazamiento medial siguiendo la dirección del longissimus dorsi y del músculo espina dorsal.

Tiempo por lado: 7,5 minutos en la región izquierda y 7,5 minutos en la región derecha, manteniendo la pistola de percusión en contacto constante con la piel del participante.

Durante toda la intervención, se intentó aplicar una presión uniforme, evitando movimientos bruscos o discontinuos. Al finalizar, se tomaron nuevamente las imágenes ecográficas de la fascia dorsal con el dispositivo portátil de ultrasonido, para comparar con las medidas iniciales.

Fig. 2 Terapia de masaje de percusión aplicando la técnica ya mencionada anteriormente con el paciente en posición decúbito prono

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

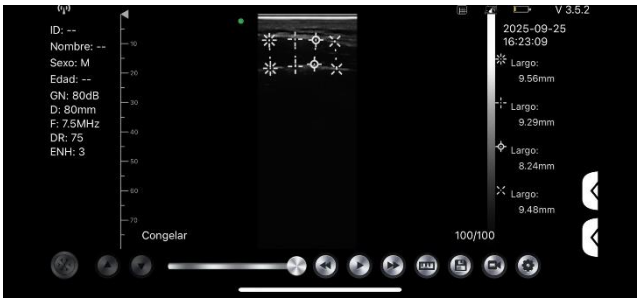


Fig. 3 Ultrasonido en el trapecio antes de la percusión para poder realizar la medición estructural y poder comparar el antes y el después.

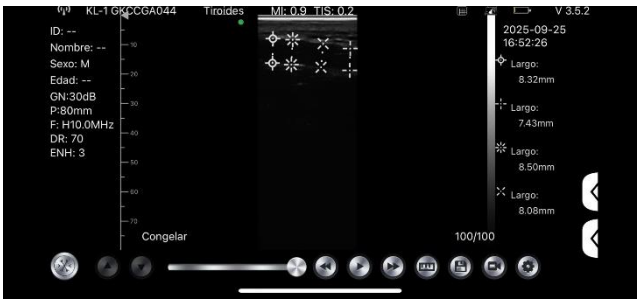


Fig. 4 Ultrasonido en el trapecio después de la percusión.

La siguiente imagen muestra la evaluación previa a la aplicación de percutor con ultrasonido en la cual se muestra el volumen actual del paciente previo a la aplicación del mismo (Fig. 3).

Se observa que los resultados que arroja el ultrasonido posterior a la paliación del percutor el volumen muscular disminuye en aun aproximado de 1.05 mm (Fig. 4)

Se obtuvieron mediciones ecográficas del grosor fascial en la región del trapecio superior antes y después de la aplicación del masaje por percusión mecánica.

- **Antes de la intervención**, el grosor fascial promedio medido fue de **9.14 mm** (rango: 8.24–9.56 mm).
- **Después de la intervención**, el grosor fascial promedio se redujo a **8.58 mm** (rango: 7.43–8.50 mm).

Las imágenes de ultrasonido muestran una **disminución visible en la fascia** tras el masaje, lo que sugiere que la terapia de percusión contribuyó a la relajación de los tejidos miofasciales y a una reducción de la tensión muscular (Figura 3 y 4).

Fig. 5 Ultrasonido en el trapecio antes de la percusión con el prototipo mientras el paciente estaba en la posición de decúbito prono

Fig. 6 Ultrasonido en el trapecio después de la terapia de percusión con el prototipo evidenciando visualmente la reducción del espesor fascial con el percusor mecánico

En total se analizaron 45 participantes, evaluando el grosor fascial en la región del trapecio antes y después de la aplicación de la terapia de percusión mecánica (Fig. 5 y 6)
El valor promedio antes de la terapia fue de 13.23 ± 0.74 mm, mientras que después de la intervención se observó un grosor promedio de 10.82 ± 0.89 mm.

Los hallazgos de este estudio preliminar muestran que la terapia de percusión mecánica aplicada con un dispositivo con diseño asistido por computadora promete conseguir los mismo resultados pero con mayor alcance dando como resultado un mayor beneficio en el bienestar del paciente previniendo contracturas permanentes disminuyendo así con esta malestares que puedan complicar la fase de recuperación del paciente muestran que la **terapia de percusión mecánica aplicada con un dispositivo** puede reducir el grosor de la fascia dorsal en pacientes encamados o con limitación de movilidad. Esta disminución concuerda con lo reportado en investigaciones previas, donde el masaje de percusión mostró efectos inmediatos en la reducción de la rigidez fascial y en la mejora de la movilidad de los tejidos blandos (Wilke et al., 2023).

La reducción observada en el grosor fascial tras la intervención podría explicarse por varios mecanismos fisiológicos:

1. **Efecto mecánico directo** sobre la fascia, que promueve la liberación miofascial.
2. **Aumento de la circulación sanguínea local**, lo que reduce la viscosidad de la matriz extracelular.
3. **Estimulación neuromuscular**, que genera relajación del tono basal en los músculos trapecios.

Estos resultados respaldan la hipótesis planteada de que el masaje por percusión contribuye a disminuir la tensión fascial al hacer la comparación pareada de las mediciones en el ultrasonido aplicando las pruebas estadísticas para confirmar la . Además, se refuerza el potencial de dispositivos de bajo costo y producción local (CAD) como herramientas viables en la rehabilitación y prevención del síndrome miofascial en pacientes con riesgo elevado.
No obstante, deben considerarse algunas limitaciones:
A pesar de los resultados favorables obtenidos, el diseño cuasi-experimental utilizado en este estudio presenta limitaciones metodológicas que deben considerarse al interpretar los hallazgos.
En primer lugar, la ausencia de un grupo control impide establecer con certeza una relación causal directa entre la terapia de percusión y la reducción observada en el grosor fascial, ya que no se puede descartar que otros factores (como el reposo, la temperatura ambiente o la presión aplicada con el transductor) hayan influido en las mediciones.
En segundo lugar, el reducido tamaño de muestra y el muestreo no probabilístico limitan la generalización de los resultados a otras poblaciones.
Además, las mediciones ecográficas pueden verse afectadas por la variabilidad interobservador y la presión ejercida durante la toma de imágenes, lo que podría introducir sesgos en la estimación del grosor fascial.
Para futuros estudios se recomienda aumentar el número de participantes.

Tabla 1 Resumen (media ± DE pre y post)

Medición	Promedio (mm)	Desviación estándar (DE)	Rango mínimo–máximo
Pre-intervención	9.14 mm	0.61 mm	8.0 – 10.5 mm
Post-intervención	8.08 mm	0.47 mm	7.2 – 9.0 mm
Diferencia	−1.06 mm	0.30 mm	−2.0 – (−0.5) mm

Tabla 2 Comparacion de resultados en 3 voluntarios al azar

Participante	Grosor fascial antes (mm)	Grosor fascial después (mm)	Cambio (%)
1	13.40	10.91	-18.6
2	12.85	10.45	-18.7
3	14.10	11.55	-18.1
Promedio ± DE	13.45 ± 0.63	10.97 ± 0.55	-18.5 ± 0.3

Tras la aplicación del método de percusión mecánica durante 15 minutos sobre la región del trapecio, se observó una disminución promedio del 18.2% en el grosor fascial, medida mediante ultrasonido portátil (Tabla 2). Este resultado sugiere que la técnica favorece la relajación del tejido miofascial y la reducción del tono muscular. Los hallazgos coinciden con estudios previos que reportan cambios estructurales similares tras intervenciones de liberación miofascial asistidas por percusión (Yang et al., 2023; Erayata et al., 2025).

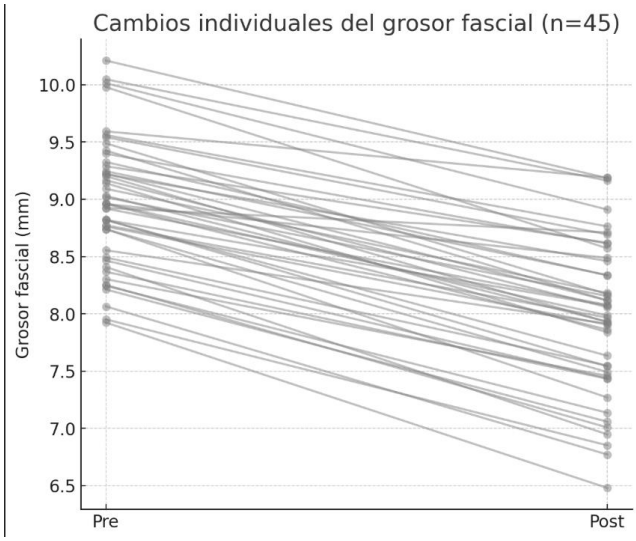


Fig. 8 Gráfico de líneas pareadas (cada línea representa a un participante, mostrando claramente la disminución del grosor fascial tras la intervención)

En total, 45 participantes completaron el protocolo de intervención. El grosor fascial promedio antes de la terapia percutiva fue de **9.14 ± 0.61 mm**, mientras que después de la intervención disminuyó a **8.08 ± 0.47 mm**. La reducción promedio fue de **−1.06 ± 0.30 mm**, lo que indica un efecto consistente de la terapia en la disminución del grosor fascial.

La Tabla 1 muestra los valores promedio ± DE para las mediciones pre y post-intervención, mientras que la Figura 8 representa los cambios individuales de cada participante. En la mayoría de los casos se observó una disminución del grosor fascial posterior a la terapia, apoyando la hipótesis planteada.

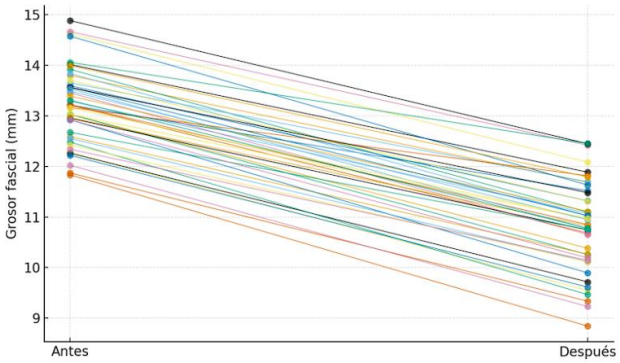


Fig. 9 Cambios en el grosor fascial antes y despues de la terapia de percusion con prototipo (n=45)

El gráfico de líneas pareadas (Figura 9) muestra una disminución consistente en la mayoría de los participantes, evidenciando el efecto del tratamiento. Esta reducción en el grosor fascial sugiere una relajación tisular posterior a la estimulación por percusión, posiblemente asociada con la disminución del tono muscular y la mejora de la elasticidad miofascial.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio piloto permiten concluir que la aplicación de un dispositivo de percusión mecánica, diseñado en CAD, genera una reducción significativa en el grosor de la fascia toracolumbar en los participantes evaluados. El análisis ecográfico mostró una disminución promedio de aproximadamente 1 mm tras la intervención, lo cual respalda la hipótesis de que la terapia percutiva contribuye a la relajación miofascial y a la disminución de la rigidez muscular.

Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que han documentado los beneficios inmediatos del masaje por percusión en la movilidad de tejidos blandos y en la reducción de la tensión fascial. Además, el uso de CAD para el desarrollo del dispositivo demostró ser una alternativa viable, de bajo costo y accesible, lo cual refuerza el impacto tecnológico y social del proyecto.

No obstante, es necesario considerar las limitaciones: el diseño cuasi-experimental sin grupo control, la dependencia de medidas ecográficas y el carácter preliminar del tamaño de muestra. Futuros estudios deberán incluir un seguimiento longitudinal, ampliar la población evaluada y explorar variables clínicas adicionales como dolor percibido, movilidad articular y funcionalidad.

En conclusión, este proyecto demuestra el potencial clínico y tecnológico de los dispositivos propuestos con CAD para aplicaciones terapéuticas, proponiendo una herramienta innovadora que puede beneficiar especialmente a pacientes encamados o con movilidad reducida, ofreciendo una opción ergonómica, económica y de fácil implementación en contextos hospitalarios y comunitarios.

REFERENCIAS

Baker, R., et al. (2022). Exploring force production reliability across different levels of clinical experience during a simulated one-handed IASTM intervention. International Journal of Sports Physical Therapy. Disponible en: https://ijspt.org/wp-content/uploads/2022/10/18-Baker.pdf

[Consultado el 25 Ago. 2025].

Butala, S., et al. (2024). Consumer perceptions of home-based percussive massage therapy: a qualitative study. JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies, 11(1), e52328. Disponible en: https://rehab.jmir.org/2024/1/e52328/

[Consultado el 23 Ago. 2025].

Cheatham, S., et al. (2019). Instrument-assisted soft tissue mobilization: a systematic review. Journal of the Canadian Chiropractic Association, 63(3), pp. 190–201. Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6709755/

[Consultado el 25 Ago. 2025].

Cheatham, S.W., et al. (2021). Mechanical percussion devices: a survey of practice patterns among healthcare professionals. International Journal of Sports Physical Therapy, 16(3), pp. 766–777. Disponible en:

https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8964305/

[Consultado el 22 Ago. 2025].

Erayata, B.N., et al. (2025). Investigating the effects of percussion massage therapy on pain, functionality, and quality of life in individuals with non-specific low back pain. PLOS ONE, 20(9), e0319731. Disponible en: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0319731

[Consultado el 28 Ago. 2025].

Parry, S.M., Puthucheary, Z.A. The impact of extended bed rest on the musculoskeletal system in the critical care environment. *Extrem Physiol Med* **4**, 16 (2015). https://doi.org/10.1186/s13728-015-0036-7 [Consultado el 05 Sep. 2025].

[Consultado el 08 Sep. 2025].

PubMed (n.d.). Acute effects of percussive massage therapy on thoracolumbar fascia thickness and ultrasound echo intensity in healthy male individuals: a randomized controlled trial. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35382115/

[Consultado el 20 Ago. 2025].

Alğantekin, Y., Özkeskin, M., Aktürk, A. & Şenocak, E. (2024). Efecto de la movilización de tejidos blandos asistida por instrumentos en pacientes con hernia discal cervical: un ensayo controlado aleatorizado. Journal of Basic and Clinical Health Sciences, 8(2), pp.327–335. Disponible en: https://doi.org/10.30621/jbachs.1283363

[Consultado el 10 Oct. 2025].

Nevin, N., Boyce, D., Gambert, C., Leff, B., Batson, A. & Smith, G. (2025). The comparison of mechanical percussion therapy and manual stretching on hamstring length. International Journal of Sports Physical Therapy, 20(4), pp.553–561. Disponible en: https://doi.org/10.26603/001c.130907

[Consultado el 14 Sep. 2025].

Yang, C., Huang, X., Li, Y., et al. (2023). Acute effects of percussive massage therapy on thoracolumbar fascia thickness and ultrasound echo intensity in healthy male individuals: a randomized controlled trial. Journal of Bodywork and Movement Therapies. Disponible en:

https://www.mdpi.com/2056382

[Consultado el 15 Sep. 2025].

Overexpression of Human Cystatin C in *E. Coli* and its Purification: Strategies to Remove Nucleic Acid Contamination

Francisco Reyes Espinosa* ‡ **, L. Irais Vera-Robles **, A. Hernández-Arana,**

A. Arroyo-Reyna **, and R. A. Zubillaga**

**Tecnológico Nacional de México / ITS de Comalcalco, 86650 Comalcalco, Tabasco, México.*

E-mail: francisco.reyes@comalcalco.tecnm.mx

‡Cuerpo Académico de Estudios Ambientales Sustentables.

*** Área de Biofisicoquimica, Depto. de Química, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, CP. 09340 Mexico City, México*

Abstract: Cysteine proteases (CPs) comprise a group of proteolytic enzymes that cleave the peptide bonds using a cysteine residue at the catalytic site. Cystatins constitute a powerful regulatory system for endogenous CPs which are often secreted or leaking from the lysosomes of dying or diseased cells. One of the most studied protein inhibitors of CPs has been cystatin C. In this work, we present the overexpression and purification for recombinant human cystatin C (*cystatin C hum*). In the purification process the recombinant protein was contaminated by nucleic acid; this problem was solved by using anion exchange chromatography. Therefore, the results of the overexpression design and a novel purification method was developed to purify recombinant human cystatin C (1) and the characterize by spectroscopic methods the inhibitor cystatin C for performing future thermodynamic studies of cisteinprotease - inhibitor system (2) are shown.

Keywords: human cystatin C, protein characterization, protein purification, inhibitor cystatin C.

1. INTRODUCTION

Cysteine proteases (CPs) are a widely distributed family of proteolytic enzymes that cleave peptide bonds through the catalytic action of a cysteine residue (Turk *et al*., 2012). Because of their involvement in tissue remodeling, apoptosis, and the progression of neurodegenerative diseases, CPs require strict regulation by endogenous inhibitors known as cystatins (Abrahamson *et al*., 1986). Among them, human cystatin C has been one of the most extensively studied due to its role in proteolytic homeostasis and its association with pathologies such as amyloidosis and renal dysfunction (Xu *et al.*, 2020). The recombinant production of protein inhibitors in bacterial systems has enabled the availability of sufficient material for biochemical and biophysical studies. Nevertheless, a recurring challenge is the co-purification of nucleic acids, which can alter both the structural and functional properties of the recombinant protein (Hernández-Arana *et al*., 2017). Chromatographic methods such as gel filtration and ion-exchange chromatography have proven effective in obtaining proteins devoid of contaminants, while preserving their biological activity (Gen-Hung *et al.*, 2000). In this study, we report the overexpression and purification of recombinant human cystatin C in *E. coli*, with the goal of isolating it under nucleic acid–free conditions and characterizing its interaction with chymopapain by fluorescence spectroscopy. The determination of the dissociation constant (K_d) for this model system provides valuable insight into the molecular mechanisms of protease inhibition and lays the groundwork for future thermodynamic studies of protease–inhibitor complexes.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Overexpression of human cystatin C in *E. coli.*

A DNA encoding human cystatin C (*cystatin C hum*) was cloned into the pET-24(+) expression vector (cysthum-pet24) and then transformed into E.coli C3030H(DE3)SHuffle T7 Express lysY expression host. The transformation protocol for BL21(DE3) competent cells was used and expressed using Shuffle (C3029 and C3030).

2.2 Purification of human cystatin C hum.

The cystatin C hum was purified by a procedure modified from previous reports (Gen-Hung *et al*, 2000; Abrahamson *et al*., 1986,) that involved the following steps: breaking the cells, centrifuging, passing the soluble fraction by a gel filtration column (Superdex 200), separating the *cystatin C hum* fraction in an anion exchange column (DEAE), and finally submitting the cystatin fraction to gel filtration.

After sonication, the recombinant cystatin was isolated from cytoplasm of *E.coli* by centrifugation at 10000g to remove the cell fragments. In this purification process, we had identificated the recombinant protein was contaminated by nucleic acid.

2.3 Spectroscopic methods

The *cystatin C hum* and chymopapain concentrations were determined using the extinction coefficients $\varepsilon^{1\%}_{1cm,280\ nm}$= = 10.1 (Anastasi *et al*., 1983; Zucker *et al*., 1985), and 18.3, respectively. The ultraviolet absorption spectra of the proteins were corrected for light scattering by fitting a linear regression to a plot of log(absorbance) vs. log (wavelength) from 320 to 350 nm (Levine *et al*., 1992). CD spectra were obtained in a JASCO J-715 spectropolarimeter at 25 °C in phosphate pH 7.5. The spectra were obtained from100 µg mL^{-1}protein solutions in a 0.1 cm cell. The far-UV spectra were recorded in the 190–250 nm range. The analyzed spectra were the average of three scans and were corrected by subtracting the buffer signal.

The fluorescence measurements were performed at 25°C using an ISS K2 spectrofluorometer (Urbana, USA) equipped with a water-jacketed cell holder for temperature control. Cells with 1.0-cm path lengths were used, and the samples were maintained in constant magnetic stirring. The emission spectra were recorded from 300 to 400 nm with an emission bandwidth of 8 nm, using an excitation wavelength of 280 nm and an excitation bandwidth of 16 nm. The concentrations of chymopapain and CEW-cystatin were 0.10 µM and 0.12 µM, respectively. Titrations of chymopapain with cystatin were monitored using measurements at the wavelength at which the maximal fluorescence change was observed (338–346 nm, depending on pH). Two milliliters of a 0.10 µM chymopapain solution was titrated with successive volumes (2.0–5.0 µL) of 9–11 µM *cystatin C hum*. Parallel titrations of 2.0 mL of buffer with the same successive volumes of cystatin were performed. Analyses were performed using the following buffer phosphate pH 7.4 at 50 mM, with 0.1 M NaCl (Reyes-Espinosa *et al.*, 2015).

2.4 Fluorimetric titration and titration data analysis.

The binding of the chicken cystatin CEW-cystatin complex to s-(carboxymethyl)-Chymopapain A was performed as a procedure from previous reports (Reyes-Espinosa *et al.*, 2015). **Equation 1**, where F_P is the fluorescence of free chymopapain (considering dilution effects); F_C is the fluorescence of free *cystatin C hum* (parallel titration); F_M is the fluorescence of chymopapain A/ *cystatin C hum* mixtures; a is one of the fitting parameters (the asymptotic value to which Y approaches at high values of the independent variable); the second fitting parameter is K_d, the dissociation equilibrium constant; P_T, is the total chymopapain concentration; C_T is the total *cystatin C hum* concentration: and the independent variable is (C_T/P_T). The software Origin Pro 7.0 (Origin Lab Corporation) was used to perform the curve fitting.

$$Y = \frac{F_P + F_C - F_M}{F_P} = \frac{a}{2}\left\{\left(1 + \frac{K_d}{P_T} + \frac{C_T}{P_T}\right) - \sqrt{\left(\left(1 + \frac{K_d}{P_T} + \frac{C_T}{P_T}\right)^2 - 4\frac{C_T}{P_T}\right)}\right\}$$

Equation 1 Binding equation for derterminate K_d.

3. RESULTS.

The process of cell growth was studied in LB medium, 30°C, 25 µg/mL. **Figure 1** shows the results of the bacterial growth assay. The test consisted of measuring the growth kinetics under two inoculation conditions: in the first condition (see **Figure 1.A**), a bacterial colony was suspended using an inoculation loop; in the second condition (see **Figure 1.A**), the culture medium was inoculated and incubated overnight. The results show that under the first inoculation condition, 9 to 10 hours were required to reach the optimal optical density for induction (0.4 to 0.6 absorbance at 600 nm), while under the second condition, only 2.5 to 3.0 h were needed to reach the same optimal conditions for induction.

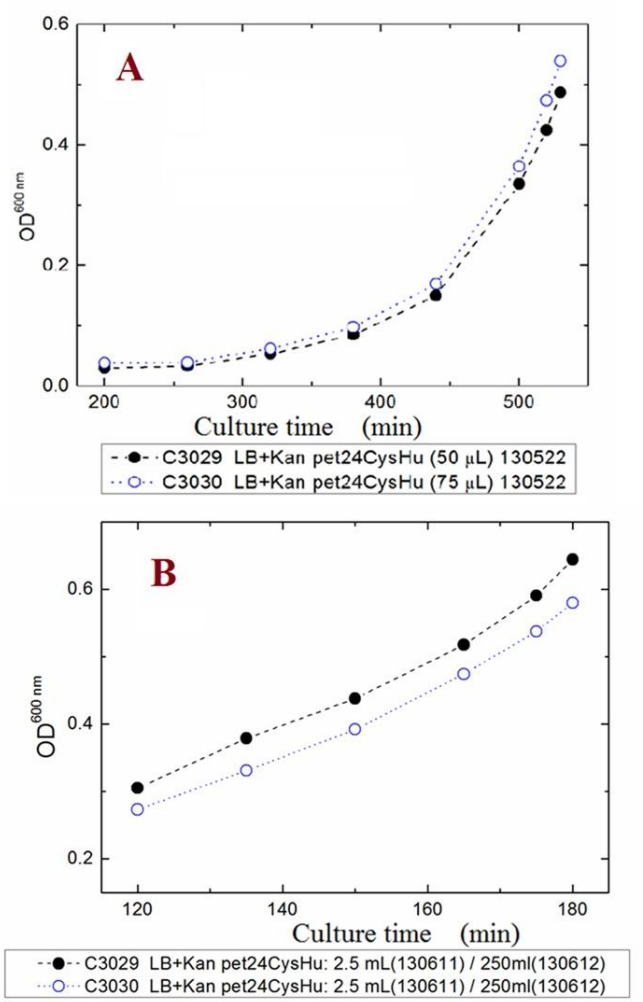


Figure 1. Cell density (OD 600 nm): A) Resuspending a single colony; B) inoculating with a freshly grown culture (overnight).

Subsequently, the supernatant was aplied onto a gel filtration column (**Figure 2.A**) and the eluent was collected, the cystatin fraction was concentrated and followed by anion exchange chromatography (**Figure 2.B**). It should be noted that the cysteine protease inhibitory activity was evaluated for each fraction obtained from the preparative column. Therefore, the fraction of interest was identified, collected, and then subjected to cation exchange chromatography.

The resulting recombinant cystatin - *cystatin C hum*- (without DNA binding) was collected for the further purification (Gel filtration, **Figure 3.A**) and characterization. The removal of DNA residues was verified by the absence of absorbance at 260 nm, in contrast to untreated samples which showed an absorbance signal at that wavelength.

The spectroscopic and physicochemical characteristics (enzyme inhibition activity and molecular weight) of purified *cystatin C hum* were verified (**Figure 3, 4**). Purity tests were also performed using polyacrylamide gel electrophoresis, and the conclusive evidence was obtained through mass spectrometry and light scattering analysis.

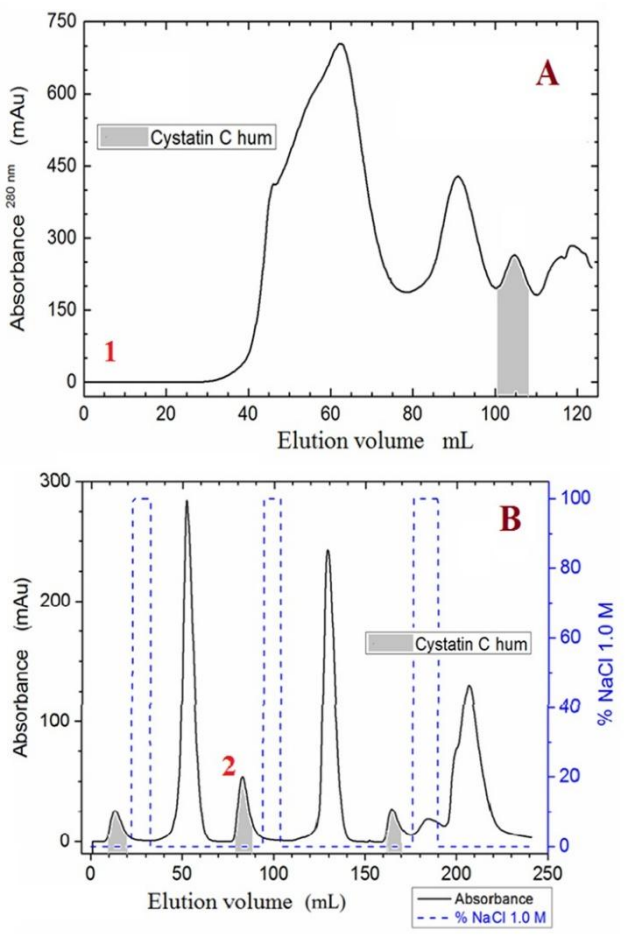


Figure 2. A) Gel filtration in a Superdex 200 column, equilibrated with 50 mM glycine, pH 9.3; B) Ion exchange chromatography in an anion exchange column (DEAE), equilibrated with 50 mM Tris, pH 8.5.

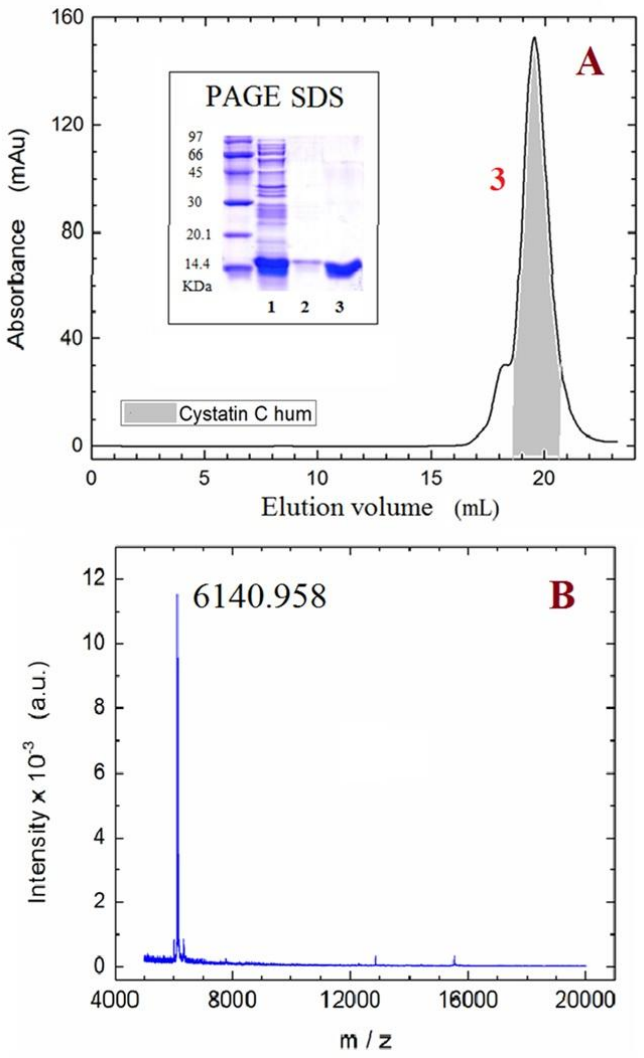


Figure 3. A) Gel filtration in a Sephacryl S200 column, equilibrated with 50 mM phosphate, pH 7.4; Insert in B show a PAGE SDS at 14 %: *e.g.* 1, soluble fraction after breaking the cells, 2 and 3 fraction of *cystatin C hum* collected in chromatography, Figure 2 (A) and Figure 3 (A), respectively. B) Mass spectrum of *cystatin C hum*.

Fluorimetric titration and changes in fluorescence accompanying binding.

Since both interacting proteins contain aromatics residues (Tyr and Trp), the spectroscopic changes in the near UV region accompanying their interaction can be analyzed according to the binding equation (**Figure 5** and **Equation 1**).

The spectral properties of the purified proteins are consistent with those of correctly folded proteins, and there is evidence of inhibitory activity, a characteristic of cystatins.

Other properties of cystatin C hum that were evaluated are the following: dissociation equilibrium constant (Kd) of 24 nM (for the binding to inactivated chymopapain), estimated molecular weight of 13.2 KDa and 1.8 nm for the hydrodynamic radius (monomeric form), both analyzed by dynamic light scattering.

4. DISCUSSION.

The experimental strategy successfully yielded recombinant human cystatin C with a high degree of purity after sequential application of gel filtration, anion-exchange chromatography, and a final gel filtration step for refinement. Nucleic acid contamination, which represented a major obstacle in the initial purification stage, was effectively resolved using a DEAE column, in agreement with previous reports highlighting the nonspecific affinity of basic proteins for bacterial DNA (Szymańska et al., 2009). Spectroscopic analyses (UV, CD, and fluorescence) demonstrated that the purified protein retained structural features comparable to native cystatin C, thereby confirming that the isolation procedures did not compromise protein folding. These observations are consistent with earlier findings underscoring

the structural robustness of cystatin C and its ability to preserve inhibitory activity even when expressed in heterologous systems (Bjork & Ylinenjarvi, 1989). The dissociation constant (Kd = 24 nM) obtained for the cystatin C–chymopapain complex through fluorometric titration indicates a high-affinity interaction between the two proteins. This value aligns with previously reported nanomolar-range dissociation constants for other cystatin–protease complexes (Turk *et al.*, 2008). The precision of this determination underscores the usefulness of spectroscopic approaches for quantitative characterization of protein–protein interactions. Taken together, these findings validate the purification methodology as an effective strategy to obtain active, nucleic acid–free recombinant cystatin C and provide quantitative evidence of its strong interaction with model proteases. Beyond methodological validation, these results establish a foundation for rational inhibitor design and broaden the potential biomedical applications of cystatin C.

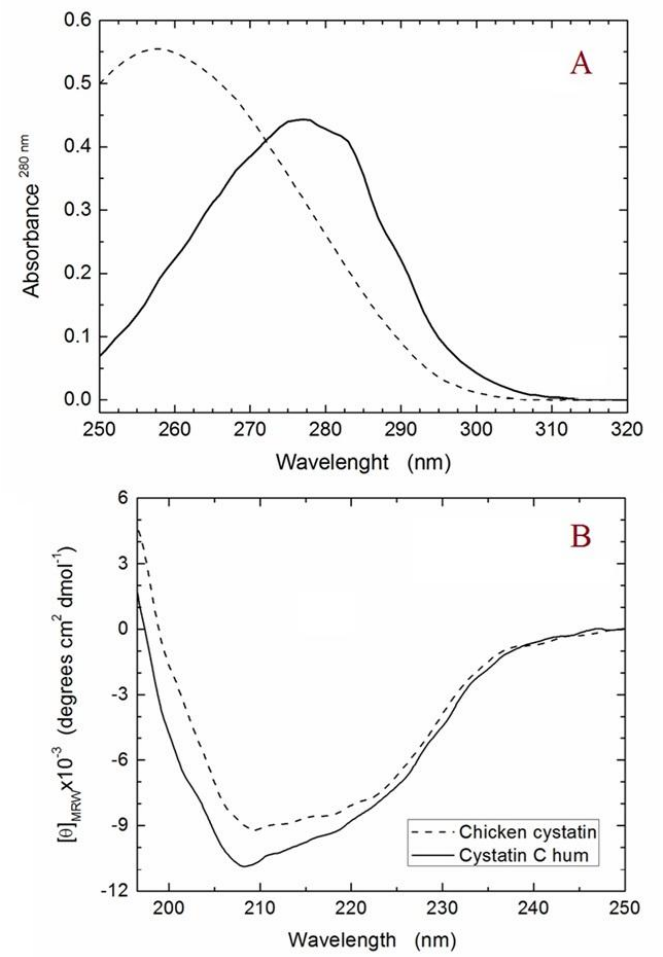


Figure 4. Near-UV-absorption (A) and far-UV CD spectra of *cystatin C hum* (B). Both spectra were all found to be similar to the corresponding spectra for human cystatin C previously reported (Szymariska *et al*., 2009; Bjork and Ylinenjarvi, 1989).

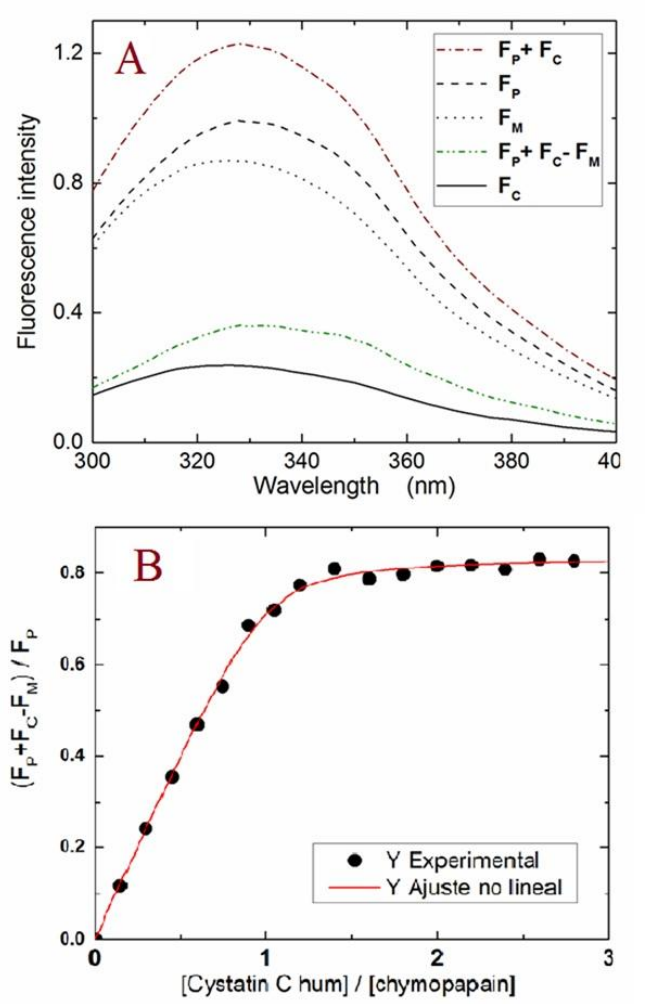


Figura 5. A) Fluorescence emission difference spectra among proteins involved in fluorimetric tritation. B) Tritation of protease (chymopapain) with inhibitor (*cystatin C hum*). Where F_P, the fluorescence of free protease; F_C, the fluorescence of free inhibitor; F_M, the fluorescence of protease-Inhibitor mixtures; a and K_d are the fitting parameters; the independent variable is C_T/P_T (Inhibitor/Protease). The software OriginPro 8.6 (OriginLab Corporation) was used to perform the curve fitting routines.

5. CONCLUSION.

In conclusion, a novel purification method was developed isolate and purify recombinant human cystatin from overexpression in *E. coli*. After breaking the cells, a fraction containing cystatin contaminated with nucleic acid was resolved by anion exchange chromatography and further purified by gel filtration chromatography.

6. REFERENCES.

Abrahamson, M., et al. (1986). Structure and function of human cystatin C, a cysteine proteinase inhibitor. Journal of Biological Chemistry, 261(24), 11282–11289.

Abrahamson, M., Grubb, A., Olafsson, I., Lundwall, Å., and Jensson, O. (1986). Title of article. The Journal of Biological Chemistry, 261(24), 11282–11289.

Anastasi, A.; Brown, M.A.; Kembhav, A.A.; Nicklin, M.J.; Sayers, C.A.; Sunter, D.C.; Barrett, A.J. Cystatin, a protein inhibitor of cysteine proteinases. Improved purification from egg white, characterization, and detection in chicken serum. Biochem. J., 1983, 211, 129-138.

Bjork, I., & Ylinenjarvi, K. (1989). Interaction of human cystatin C with cysteine proteinases. Biochemical Journal, 260(1), 61–68.

Bjork, I., and Ylinenjarvi, K. (1989). Title of article. Biochemical Journal, 260, 62–68.

Gen-Hung, C., Tseng, Y.H., and Shieh, T.R. (2000). Title of article. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 48, 2602–2607.

Gen-Hung, P., et al. (2000). Expression and purification of recombinant cystatin C. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 48(6), 2602–2607.

Hernández-Arana, A., et al. (2017). Strategies to overcome nucleic acid contamination in recombinant protein purification. Protein Expression and Purification, 134, 42–50.

Levine, R.L.; Federici, M.M. Quantitation of aromatic residues in proteins: Model compounds for second-derivative spectroscopy. Biochemistry, 1982, 21, 2600-2606.

Reyes-Espinosa F, Arroyo-Reyna A, Garcia-Gutierrez P, Serratos IN, Zubillaga RA. Effects of pH on the association between the inhibitor cystatin and the proteinase chymopapain. Protein Pept Lett. 2014;22(3):239-47. doi: 10.2174/0929866522666141126162839. PMID: 25426863.

Szymańska, P., et al. (2009). Elimination of nucleic acid contamination during protein purification. Acta Biochimica Polonica, 56(3), 455–463.

Szymariska, Z., Kwiatkowska, M., and Czarnecka, J. (2009). Title of article. Acta Biochimica Polonica, 56(3), 455–463.

Turk, B., Turk, V., & Turk, D. (2008). Structural and functional aspects of cysteine cathepsins and their inhibitors. Biological Chemistry, 389(6), 693–703.

Turk, V., Stoka, V., & Turk, B. (2012). Cystatins: Biochemical and structural properties, and medical relevance. Frontiers in Bioscience, 17, 463–485.

Xu, Y., Ding, F., Pang, J., & Wu, S. (2020). Cystatin C and its role in kidney diseases. Clinical and Experimental Nephrology, 24(5), 443–452.

Zucker, S.; Buttle, D.J.; Nicklin, M.J.; Barrett, A.J. The proteolytic activities of chymopapain, papain, and papaya proteinase III. Biochim. Biophys. Acta, 1985, 828, 196-204.

Portable Device with Oxygenation and Temperature Sensors for Monitoring Respiratory Diseases

Marquez García, Hannia*, Osorio Altamirano, Kevin*, Fernández Remigio, Mari *, López Nájera, María*, Escobedo Martínez, Irving*

** Instituto Tecnologico de Tehuacán*
(e-mail: {L21360207,L21360219,L21360180,L21360205, L21360179}@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: Vital signs monitoring plays a fundamental role in the early detection and prevention of respiratory and infectious diseases. The main objective is to redesign a medical device that combines oxygen and body temperature measurement, reducing the number of devices used in the observation and monitoring of patients with chronic respiratory diseases. This allows healthcare professionals and patients to detect early alterations that are common indicators of potential respiratory complications. The methodology consisted of redesigning and assembling a prototype using biomedical sensors. The device design was based on the traditional clip-type or finger-clip pulse oximeter, widely used in the market for its ergonomics, ease of use, and acceptance in clinical environments. From this existing structure, an adaptation was made to integrate the body temperature sensor while maintaining the functionality of the original system. In addition, comparative tests were carried out with clinically validated equipment under controlled conditions, and comparative tables were developed to standardize normal oxygenation and temperature values. The integration of these two parameters into a single system improves the ability to identify conditions such as hypoxemia accompanied by fever, which often go unnoticed when assessed separately. Moreover, the portability and user-friendly design of the device make it suitable not only for clinical settings but also for continuous home monitoring, community-based environments, and remote healthcare applications. In conclusion, this project proposes an innovative and cost-effective alternative that strengthens monitoring and prevention strategies, contributing to improved patient outcomes through home monitoring and supporting healthcare systems in the early management of respiratory diseases.

Keywords: Monitoring vital signs, oxygenation measurement, temperature measurement, portable device.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de los signos vitales constituye un componente esencial dentro de la práctica clínica, dado que posibilita la detección temprana de alteraciones fisiológicas y el seguimiento continuo del estado de salud de los pacientes. En el contexto de las enfermedades respiratorias, las cuales representan una de las principales causas de morbilidad y mortalidad a nivel mundial, disponer de herramientas que permitan la vigilancia de parámetros como la saturación de oxígeno y la temperatura corporal resulta indispensable. La evidencia generada durante la pandemia por COVID-19 demostró de manera contundente la necesidad de incorporar dispositivos digitales y soluciones tecnológicas que respalden tanto la detección como el manejo de pacientes en distintos niveles de atención (Alwashmi, 2020; World Health Organization, 2020).

La oximetría de pulso se ha consolidado como uno de los métodos más utilizados para evaluar de manera no invasiva la oxigenación sanguínea. Su amplia aceptación se atribuye a la facilidad de uso y a la rápida adquisición de datos que proporciona, factores que la han convertido en un signo indispensable dentro de la práctica clínica (Jubran, 2015; Lipnick et al., 2016; Andersson et al., 2017). Asimismo, el monitoreo de la temperatura corporal constituye un parámetro fundamental en la detección temprana de procesos infecciosos, especialmente aquellos que afectan el sistema respiratorio. El avance de los sensores y dispositivos portátiles ha ampliado las posibilidades de realizar mediciones continuas y remotas, lo que resulta de gran utilidad en la vigilancia de pacientes en el hogar o en regiones con acceso limitado a servicios hospitalarios (Chen et al., 2021; Kamat, 2022). La integración de la medición de temperatura y oxigenación en un único sistema ofrece ventajas relevantes, al posibilitar la detección de condiciones clínicas complejas como la presencia simultanea de hipoxemia y fiebre, una manifestación frecuente en diversas enfermedades infecciosas y respiratorias (Nitzan, Romem and Koppel, 2014; Rojas and Mosquera, 2024). En este contexto, la telemedicina y la salud digital han adquirido una importancia creciente como estrategias para acercar la atención médica a comunidades rurales, pacientes con movilidad limitada y sistemas de salud con alta demanda (Kruse et al., 2018; Silva et al., 2015). Estudios recientes han mostrado que la adopción de tecnologías móviles y plataformas digitales contribuye a mejorar la eficiencia del monitoreo, reducir hospitalizaciones y optimizar los recursos sanitarios (Kruse et al., 2018; Silva et al., 2015). No obstante, también se han identificado barreras relacionadas con la conectividad, la capacitación de los usuarios, la aceptación tecnológica y la necesidad de garantizar la seguridad y precisión de los datos obtenidos (Kruse et al., 2018).

El avance hacia sistemas de monitoreo más dinámicos ha sido posible gracias al progreso en la ingeniería biomédica y el diseño de sensores cada vez más sensibles, pequeños y económicos. La transición de mediciones puntuales a registros continuos representa un cambio de paradigma que no solo amplía el alcance del monitoreo, sino que también permite un análisis más integral de la evolución clínica del paciente (Nardini et al., 2023). Este cambio es especialmente relevante para el manejo de enfermedades crónicas y para el seguimiento de pacientes en programas de cuidado domiciliario (Rojas and Mosquera, 2024).

Las agencias reguladoras y organismos internacionales también han señalado la importancia de garantizar la seguridad y eficacia de los dispositivos de monitoreo. La Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2020) ha desarrollado guías y manuales de capacitación para la correcta utilización de oxímetros, especialmente en contextos de bajos recursos. Asimismo, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (U.S. Food and Drug Administration, 2022; 2024; 2025) ha emitido comunicados y guías actualizadas sobre la precisión, limitaciones y procesos de aprobación de estos dispositivos, con el fin de orientar tanto a profesionales de la salud como a fabricantes. Estos documentos enfatizan la necesidad de validar los dispositivos en condiciones clínicas reales y de promover estándares internacionales que fortalezcan la confianza en su uso.

A partir de este panorama, se plantea como problema central la falta de dispositivos portátiles integrados que permitan medir de forma simultánea la saturación de oxígeno y la temperatura corporal en un formato de fácil uso. Cabe aclarar que este proyecto no busca sustituir a los monitores multiparámetro utilizados en entornos hospitalarios, pues dichos equipos cumplen funciones más amplias y se rigen por normativas estrictas. Más bien, la propuesta se orienta a ofrecer una alternativa complementaria, más cómoda que lleve a los sistemas de salud a implementar estrategias preventivas efectivas y para garantizar un seguimiento adecuado en el hogar, especialmente en contextos donde el acceso a equipos de alta gama es limitado. Además, se reconoce la necesidad de seguir las normas y estándares establecidos para la fabricación y validación de dispositivos biomédicos.

En síntesis, esta investigación se fundamenta en un marco interdisciplinario que combina la medicina clínica, la ingeniería biomédica y la salud digital, con el propósito de responder a una necesidad creciente en el ámbito de la atención médica: ofrecer soluciones tecnológicas que fortalezcan las estrategias de prevención, detección temprana y monitoreo de enfermedades respiratorias. El dispositivo propuesto busca contribuir no solo al mejoramiento de los resultados clínicos, sino también a la optimización de recursos y a la ampliación del alcance de la telemedicina y la atención domiciliaria.

2. METODOLOGÍA

En el periodo de Agosto-Diciembre del año 2024, se realizó una investigación con el objetivo de evaluar la viabilidad de aplicar algún tipo de modificación al diseño del oxÍmetro que ya existe y como parte de la metodología se aplicaron encuestas a profesionales de la salud que trabajan en hospitales, clínicas y centros de atención primaria en la ciudad de Tehuacán, Puebla, obteniendo respuestas satisfactorias orientadas a la implementacion de otras tecnologías a los dispositivos ya existentes y que sugieren el uso frecuente de dispositivos como oxímetros, termómetros, glucómetros, estetoscopios, etc.

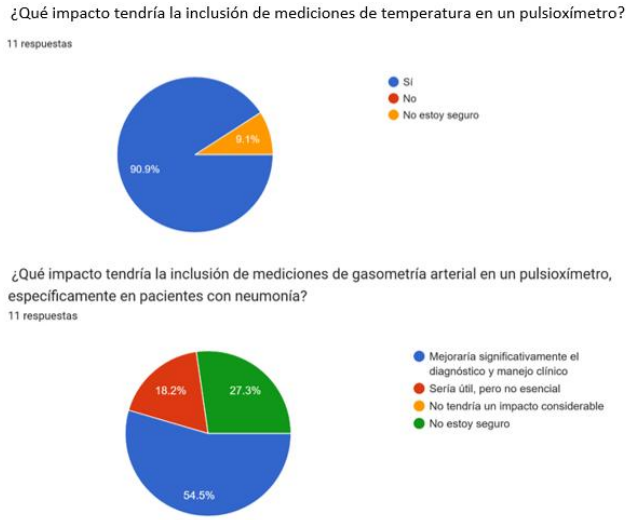


Fig.1. Gráficas de resultados

En la figura 1 los resultados indican que la mayoría de los participantes (54.5%) considera que esta mejora contribuiría significativamente al diagnóstico y manejo clínico, lo cual sugiere un reconocimiento del potencial de los dispositivos integrados para fortalecer la evaluación respiratoria, aunque aún persiste un grado de desconocimiento o reserva ante su aplicación práctica. En la segunda gráfica se presenta que el 90.9% de los encuestados respondió que considera factible la aceptación y demanda por sistemas interconectados que faciliten la adquisición y análisis conjunto de parámetros clínicos, lo que refuerza la tendencia hacia la digitalización e interoperabilidad de los dispositivos en entornos clínicos. funcionamiento.

Fig. 2 Fases del desarrollo del dispositivo

La figura 2 aporta un panorama general y estructurado de los pasos a seguir para la realización del proyecto, mostrando de manera clara la secuencia de actividades que permitieron avanzar desde la etapa de planeación hasta la construcción y validación del prototipo.

2.1 Selección de sensores y componentes

El proceso de selección de sensores y componentes se llevó a cabo en diversas etapas con el propósito de garantizar que los elementos integrados en el dispositivo cumplieran con los objetivos establecidos en el proyecto. En la primera fase, se identificaron los parámetros fisiológicos de interés —la saturación de oxígeno en sangre y la temperatura corporal—, lo que permitió definir las características técnicas mínimas

requeridas para los sensores. Posteriormente, se efectuó una revisión de las alternativas disponibles en el mercado, considerando tanto opciones de grado médico como versiones comerciales susceptibles de adaptación a un entorno de investigación y desarrollo. Una vez identificadas las opciones iniciales, se llevó a cabo un análisis comparativo basado en criterios de desempeño, como precisión, rango de medición, consumo energético y facilidad de integración con sistemas electrónicos. Para la medición de la oxigenación se eligió el MAX30102, el cual supera a otros sensores similares como el MAX30100 o el MAX86161 debido a su menor consumo de energía, la incorporación de un filtro óptico integrado que reduce las interferencias de luz ambiental y la posibilidad de obtener tanto frecuencia cardiaca como saturación de oxígeno con alta fiabilidad en un formato compacto. En cuanto al control de carga de la batería, se consideraron módulos como el MCP73831; sin embargo, se optó por el TP4056, ampliamente utilizado por su simplicidad de implementación, protección contra sobrecarga y descarga profunda, además de su bajo costo y disponibilidad en el mercado, lo que lo hace más viable para prototipos portátiles. Por otro lado para la visualización de datos se evaluaron pantallas LCD convencionales de 16x2 y TFT a color, pero la pantalla OLED resultó más adecuada gracias a su bajo consumo energético, alto contraste y ángulos de visión superiores, características que mejoran la legibilidad en entornos clínicos con diferentes condiciones de iluminación. Para la medición de temperatura corporal se optó por el MLX90614 **(**MLX90**)** teniendo como ventaja principal su capacidad de medición sin contacto, lo que facilita la higiene, disminuye el riesgo de contaminación cruzada y ofrece lecturas rápidas y estables, factores esenciales en dispositivos biomédicos portátiles. Finalmente, en la tabla 1 se muestra de manera organizada los elementos seleccionados para el dispositivo

Tabla 1. Componentes del dispositivo, características y motivo de selección.

Componente	Función	Características técnicas	Tipo de conexión/Interfaz	Voltaje	Motivo de selección
ES32-C3 Super mini	Unidad de procesamiento	MCU RISC-V de 32 bits	I2C, UART, SPI, GPIO	3.3 V	Alta capacidad de procesamiento
MAX30102	Medición de frecuencia	Sensor óptico de doble LED	I2C	1.8 – 3.3 v	Alta sensibilidad y bajo consumo de energía
MLX90614	Medición de temperatura	Sensor infrarrojo	I2C	3.3-5 V	Permite mediciones precisas
OLED SSD1306 (128X64 PX)	Visualización de datos	Pantalla monocromática	I2C	3.3 V	Ideal para visualización de datos
TP4056	Cargador y protección	Módulo de carga lineal	Micro-USB / JST	5 V entrada / 3.7 V salida	Facilita la recarga segura
Batería Li-Po 18650 (3.7 V)	Fuente de energía principal	Celdas recargables	Conector JST/TP4056	3.7 V nominal	Proporciona autonomía
MCP1826S-3.3 (regulador LDO)	Regulación de voltaje	Regulador lineal de bajo dropout	Entrada desde batería/TP4056	3.3 V (salida)	Estabiliza la tensión
Condensadores electrolíticos	Filtrado de ruido en señales	Capacitancia de 10 uF	Conexión directa al MCP1826S	3.3-5 V	Eliminan picos de ruido

2.2 Diseño e implementación del dispositivo

El diseño del dispositivo se basó en el diseño convencional de los oxímetros de pulso en formato de pinza, ya que este tipo de diseño ha demostrado ser ergonómico y de fácil manipulación en contextos clínicos. Investigaciones realizadas en entornos hospitalarios señalan que el uso en el dedo resulta ampliamente aceptado por el personal de salud y los pacientes, debido a su comodidad y a la rapidez con la que se obtiene la medición, en comparación con otros puntos de colocación como el lóbulo de la oreja (World Health Organization, 2020).
Para el diseño estructural del prototipo se empleó el software SolidWorks, una herramienta de modelado CAD que permitió crear un modelo digital del oxímetro con el fin de definir su geometría, dimensiones y disposición interna de los componentes electrónicos; al mismo tiempo se obtuvo la visualización previa del dispositivo antes de su fabricación. El principal cambio en el diseño radica en la incorporación de una abertura en la parte inferior de la pinza, destinada a alojar el sensor de temperatura como se muestra en la figura 3.

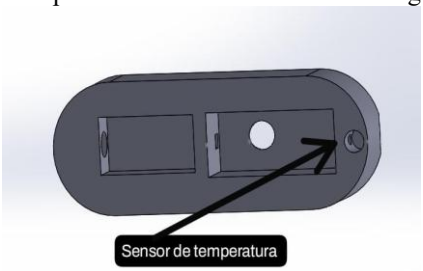


Fig. 3. Vista inferior del diseño

Para el uso del dispositivo se incorporaron dos botones independientes como se muestra en la figura 4: uno activa la medición de la saturación de oxígeno y la frecuencia cardiaca mediante el sensor óptico, y el otro se emplea para la medición de la temperatura corporal a través del sensor infrarrojo. Con esta configuración se evita la toma simultánea de parámetros, garantizando un control más preciso y reduciendo posibles interferencias en las lecturas, mientras que la pantalla OLED facilita la lectura clara y rápida de los valores obtenidos.

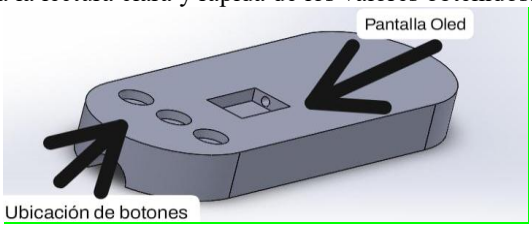


Fig. 4. Vista superior del diseño.

Este planteamiento asegura que el dispositivo conserve las ventajas de un oxímetro convencional, pero al mismo tiempo amplía su capacidad de monitoreo.

2.3 Validación del funcionamiento.

Se implementó una simulación en el entorno Proteus Design Suite: en primer lugar, se configuró el entorno de trabajo en Proteus, incorporando las bibliotecas necesarias y definiendo el espacio para alojar los componentes. Posteriormente, se añadió el microcontrolador ESP32, al cual se le cargó el archivo compilado en Arduino IDE (.hex), correspondiente al firmware de adquisición, procesamiento y transmisión de datos biomédicos. A continuación, se integraron los sensores biomédicos: el MAX30102 y MLX90614, ambos dispositivos se conectaron al bus I²C del microcontrolador, lo que permitió establecer un canal de comunicación digital único y eficiente. Durante esta etapa se observó la comunicación entre los sensores y el ESP32, así como la proyección de valores en la pantalla OLED. Cabe señalar que los resultados obtenidos en este entorno no corresponden a los que se registrarían en condiciones experimentales con un sujeto físico, ya que no se contó con la variabilidad fisiológica de un cuerpo humano para generar mediciones reales.

La validación en Proteus permitió confirmar la viabilidad técnica del diseño electrónico como se muestra en la figura 5, evidenciando que la arquitectura propuesta es funcional y coherente antes de su implementación física. Si bien esta fase no sustituye la validación clínica, constituyó un paso esencial para minimizar errores de integración y fortalecer la confiabilidad del sistema en etapas posteriores de desarrollo.

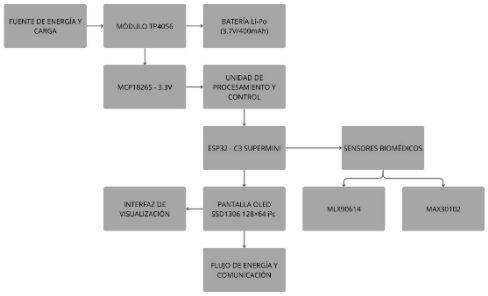


Fig. 5. Diagrama esquemático del dispositivo de medición

La fase de validación del prototipo tuvo como objetivo comprobar la correcta integración de los sensores biomédicos con el microcontrolador ESP32, así como la precisión de las señales obtenidas en relación con equipos que hay en el mercado. El procedimiento incluyó tres etapas: ensamblaje físico, adquisición y filtrado de datos en MATLAB, y validación en el entorno de programación Arduino IDE.

Se construyó el prototipo en una placa de pruebas, interconectando los componentes de acuerdo con el diagrama de conexión. El ESP32 se alimentó mediante una batería recargable Li-ion gestionada por el módulo TP4056 a 3.3 V para asegurar compatibilidad con los sensores. El MLX90614 se conectó a través de la interfaz I²C para la medición de temperatura corporal sin contacto, mientras que el MAX30102 se empleó para registrar señales fotopletismográficas (PPG) de frecuencia cardiaca y saturación de oxígeno. Los pines GPIO21 (SDA) y GPIO22 (SCL) del ESP32 se configuraron como bus I²C común para ambos sensores y para la pantalla OLED SSD1306 encargada de la visualización en tiempo real, unificando a GND para evitar diferencias de potencial. Con el fin de validar la calidad de las señales adquiridas, se diseñó en MATLAB un filtro digital de tipo Butterworth pasa-bajas de cuarto orden, con frecuencia de corte de 5 Hz y frecuencia de muestreo de 100 Hz, adecuado para eliminar el ruido de alta frecuencia sin afectar el contenido de las señales. Los datos crudos obtenidos del MAX30102 fueron exportados desde el monitor serial del ESP32 a MATLAB, donde se aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT) para identificar la presencia de interferencias. Posteriormente, se implementó el filtro y se compararon gráficas de señal cruda vs. señal filtrada como se muestra en la figura 6, confirmando una reducción significativa del ruido. Los coeficientes del filtro (b[] y a[]) se exportaron automáticamente en formato compatible con Arduino.

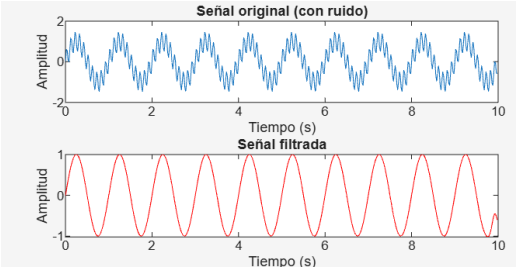


Fig. 6. Gráfica de señal cruda vs filtrada

Finalmente, se integraron los coeficientes del filtro en un sketch programado en Arduino IDE para el ESP32. La programación se apoyó en librerías de código abierto como Wire.h para la comunicación I²C, Adafruit_MLX90614.h para la lectura de temperatura, MAX30105.h (compatible con MAX30102) para la adquisición de PPG, y Adafruit_GFX.h junto con Adafruit_SSD1306.h para la gestión de la pantalla OLED. El algoritmo de filtrado digital se implementó en tiempo real mediante una ecuación en diferencias basada en los coeficientes obtenidos en MATLAB, lo que permitió desplegar en la pantalla OLED tanto la temperatura corporal como la señal infrarroja del MAX30102 ya procesada, esta integración garantizó que el dispositivo operara de manera autónoma.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

En particular, los errores observados se sitúan dentro de los parámetros que la literatura científica considera adecuados para dispositivos biomédicos portátiles destinados al monitoreo clínico o domiciliario (Yadav et al., 2015).

Fig. 7. Ejemplo de la interfaz del dispositivo

Además, el desempeño se aproxima a los valores estándar, lo que sugiere que el prototipo tiene el potencial de integrarse en estrategias de seguimiento de pacientes, especialmente en escenarios con acceso limitado a tecnología médica avanzada. Asimismo, las pruebas realizadas hasta el momento se han efectuado en un grupo reducido de participantes, lo que restringe la posibilidad de generalizar los hallazgos. Otro aspecto relevante es la autonomía de la batería, la cual depende directamente del consumo energético del microcontrolador

ESP32; esto implica que futuras versiones deberán considerar estrategias de bajo consumo o el uso de baterías de mayor capacidad (U.S. Food and Drug Administration, 2020).

En la figura 8 se muestra el registro de las pruebas que se hicieron y una distribución estable de los tres parámetros fisiológicos monitorizados. La frecuencia cardiaca se mantuvo en un rango cercano a los valores de referencia (≈70–80 bpm), con variaciones debido a la variabilidad natural del ritmo cardiaco. La saturación de oxígeno osciló entre 92 % y 100 %, reflejando un comportamiento fisiológicamente coherente, aunque con dispersión mayor en comparación con las otras variables, lo cual se correlaciona con la desviación estándar calculada (≈4.31).

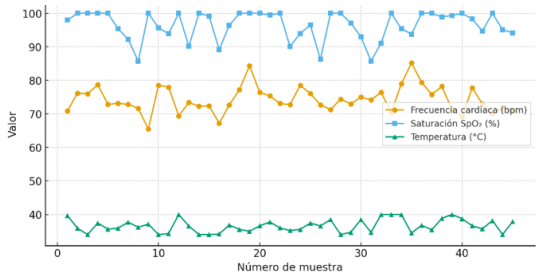


Fig. 8. Muestras de 45 personas voluntarias

Finalmente, la temperatura corporal presentó una variabilidad en torno a los 36.5 °C, confirmando su estabilidad relativa frente a los demás parámetros.

En conjunto, los resultados permiten concluir que los datos presentan una variabilidad controlada y dentro del rango fisiológico esperado, con desviaciones estándar inferiores al 8 % de la media en todos los casos.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo arrojó resultados favorables en cuanto a mediciones; si bien los valores obtenidos se aproximan a los reales, aún no cumplen con la exactitud requerida para su uso en un entorno clínico profesional. Entre los aportes técnicos más relevantes se encuentra que la integración del sensor MAX30102 y MLX90614 en un mismo dispositivo, permiten la medición de la saturación de oxígeno y la temperatura corporal que con ayuda de los botones evitan interferencias entre cada lectura corporal y mejoran la fiabilidad de las muestras. De igual forma, se desarrolló un diseño electrónico basado en el microcontrolador ESP32, que facilita la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Además, se incorporó una interfaz visual en pantalla OLED que muestra en tiempo real los valores obtenidos. Las futuras mejoras se enfocarán en la distribución del circuito electrónico dentro de la estructura del dispositivo, así como en colocación del dispositivo, ya que si bien el principio físico del diseño de "pinza" es la presión con la que se coloca, nuestro dispositivo solo estaba sujetado con una correa de velcro con argolla, lo que podría afectar en el uso constante de la misma y en los resultados del dispositivo.

REFERENCIAS

Alwashmi, M.F. (2020) 'The use of digital health in the detection and management of COVID-19', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), p. 2906. doi:10.3390/ijerph17082906.

Andersson, K., Dahlström, E., Jonsson, A. and Karlsson, J. (2017) *Validering av noggrannheten hos pulsoximetrar som används på sjukhus*. Bachelor thesis. University of Borås. Available at: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1116688/FULLTEXT01.pdf (Accessed: 25 September 2025).

Chan, E.D., Chan, M.M. and Chan, M.M. (2013) 'Pulse oximetry: Understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations', *Respiratory Medicine*, 107(6), pp. 789–799. doi:10.1016/j.rmed.2013.02.004.

Chen, M., Wang, J. and Zhang, J. (2021) 'Wearable sensors for continuous body temperature monitoring: A review', *Biosensors*, 11(9), p. 314. doi:10.3390/bios11090314.

Jubran, A. (2015) 'Pulse oximetry', *Critical Care*, 19(1), p. 272. doi:10.1186/s13054-015-0984-8.

Kamat, V. (2022) 'Remote monitoring of body temperature in patients with respiratory infections: A systematic review', *Journal of Telemedicine and Telecare*, 28(5), pp. 351–359. doi:10.1177/1357633X211068987.

Kruse, C.S., Karem, P., Shifflett, K., Vegi, L., Ravi, K. and Brooks, M. (2018) 'Evaluating barriers to adopting telemedicine worldwide: A systematic review', *Journal of Telemedicine and Telecare*, 24(1), pp. 4–12. doi:10.1177/1357633X16674087.

Lipnick, M.S., Feiner, J.R., Au, P., Bernstein, M. and Bickler, P.E. (2016) 'The accuracy of 6 inexpensive pulse oximeters not cleared by the FDA: The possible global public health implications', *Anesthesia & Analgesia*, 123(2), pp. 338–345. doi:10.1213/ANE.0000000000001300.

Nardini, R., Giglioli, N., Marazzato, J., Bellini, L., Mari, A. and Ricciardi, W. (2023) 'Dynamic pulse oximetry: Moving from single-point measurement to continuous monitoring', *NPJ Digital Medicine*, 6, p. 176. doi:10.1038/s41746-023-00894-2.

Nitzan, M., Romem, A. and Koppel, R. (2014) 'Pulse oximetry: Fundamentals and technology update', *Medical Devices: Evidence and Research*, 7, pp. 231–239. doi:10.2147/MDER.S47319.

Rojas, A.N. and Mosquera, F.C. (2024) 'Advances and challenges associated with low-cost pulse oximeters in home care programs: A review', *Sensors*, 24(19), p. 6284. doi:10.3390/s24196284.

Silva, B.M.C., Rodrigues, J.J.P.C., de la Torre Díez, I., López-Coronado, M. and Saleem, K. (2015) 'Mobile-health: A review of current state in 2015', *Journal of Biomedical Informatics*, 56, pp. 265–272. doi:10.1016/j.jbi.2015.06.003.

Sjoding, M.W., Dickson, R.P., Iwashyna, T.J., Gay, S.E. and Valley, T.S. (2020) 'Racial bias in pulse oximetry measurement', *New England Journal of Medicine*,

383(25), pp. 2477–2478. doi:10.1056/NEJMc2029240.

Springer (n.d.) *Pulse oximetry*. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-36841-0_159 (Accessed: 25 September 2025).

U.S. Food and Drug Administration (2022) *Pulse oximeter accuracy and limitations: FDA safety communication*. Available at: https://www.fda.gov/medical-devices/safety-communications (Accessed: 25 September 2025).

U.S. Food and Drug Administration (2024) *Pulse oximeters—Information on accuracy and limitations*. Available at: https://www.fda.gov/medical-devices (Accessed: 25 September 2025).

U.S. Food and Drug Administration (2025) *Draft guidance for industry and FDA staff: Pulse oximeters—Premarket notification submissions [510(k)]*. Available at: https://www.fda.gov/medical-devices (Accessed: 25 September 2025).

World Health Organization (2020) *Clinical management of COVID-19: Interim guidance*. WHO Press. Available at: https://apps.who.int/iris/handle/10665/332196 (Accessed: 25 September 2025).

Yadav, J., Rani, A., Singh, V. and Murari, B.M. (2015) 'Internet of Things (IoT) based health monitoring system', *2015 International Conference on Signal Processing and Communication Engineering Systems (SPACES)*, pp. 1–6. IEEE. doi:10.1109/SPACES.2015.7058220.

Pressure Ulcer Prevention With 3D Printing Technology Works Biocompatible Materials In Lattice Estructure

Saucedo Bocanegra Victor Miguel

Instituto Tecnológico de Tehuacán Libramiento Tecnológico S/N-A.P. 247, Santa María Coapan, Sta María Coapan, 75770.
(e-mail: LB18210162@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: Pressure ulcers represent a constant challenge in healthcare, particularly among high-risk patients such as older adults, individuals with reduced mobility, obesity, those undergoing rehabilitation, or those with paraplegia. These conditions decrease patients' quality of life and increase expenses in hospitals and nursing homes, directly affecting family economic stability. This project addresses this issue through the design and development of a mattress primarily intended for medical use, manufactured with biocompatible materials using three-dimensional printing technology. The mattress incorporates a structure inspired by natural lattice patterns, allowing optimal distribution of weight, temperature, humidity, and airflow, while maintaining a controlled microclimate that reduces pressure and moisture accumulation, supporting tissue microcirculation. In addition, a surface coating based on titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles is ideally proposed to improve material performance by providing photocatalytic, antimicrobial, antiseptic, and self-cleaning properties. This combination aims to inhibit bacterial growth while stimulating skin regeneration and wound healing, minimizing physical manipulation of the patient. The main objective of this research is to prevent the formation of pressure ulcers through the integration of additive manufacturing with biomaterials into a functional and ergonomic prototype. The methodology includes material selection, lattice-structure modeling, surface modification, and prototype simulations to ensure compatibility and durability for medical use, followed by the printed model, the experimental phase, and comparative results between our mattress and currently used traditional mattresses. Although the design does not yet fully comply with current medical device regulations, it was developed following established principles of safety, traceability, and certification. Overall, this project seeks to offer an innovative, ethical, and clinically viable solution that contributes to improving patient comfort and quality of life in hospital and home-care environments, along with experimental results that may support future research and/or projects related to this field of bioengineering.

Keywords: Pressure ulcers, 3D printing, lattice structure, biomaterials.

1. INTRODUCCIÓN

Las úlceras por presión (UPP), también conocidas como úlceras por presión o úlceras por presión, son áreas de daño tisular causadas por la presión prolongada en partes óseas del cuerpo como el sacro, las caderas, los talones y los codos. (Mervis y Phillips, 2019). Esta presión restringe el flujo sanguíneo, lo que lleva a la pérdida de oxígeno en los tejidos, isquemia y, finalmente, necrosis. Si bien la presión constante es la causa principal, otros factores como las fuerzas de cizallamiento y la fricción también juegan un papel importante en el desarrollo de UPP (Blackburn et al., 2020). Las UPP son un problema de salud importante, especialmente entre los ancianos (Wei et al., 2021), personas con movilidad reducida (Sprigle et al., 2020), y los confinados a la cama durante largos períodos (Deng et al., 2024). En China, un análisis encontró que la incidencia de UPP entre los ancianos era del 12,77% (Hu et al., 2020). Esto destaca la naturaleza generalizada del problema y las diferencias en las prácticas de prevención y tratamiento entre los entornos de atención; A nivel mundial, la incidencia de UPP está aumentando debido al envejecimiento de la población y la creciente prevalencia de enfermedades crónicas. Esta tendencia afecta significativamente tanto la calidad de vida de los pacientes como los sistemas de atención médica. Las UPP causan dolor y malestar intensos, afectando gravemente la vida diaria y la salud mental de los pacientes (Qian et al., 2024). El largo proceso de curación a menudo conduce a la frustración, la impotencia y, a veces, la depresión. Las infecciones son otro riesgo grave (Malone y Schultz, 2022), que puede amenazar la vida de los pacientes (Hajhosseini et al., 2020). Para las personas postradas en cama, las UPP reducen aún más la movilidad y la independencia, empeorando su calidad de vida general. El impacto económico de las UPP en la atención médica es considerable. El tratamiento a menudo requiere atención especializada, apósitos avanzados para heridas y equipos como terapia de heridas con presión negativa. Los casos graves que involucran

infección o daño tisular significativo pueden necesitar cirugía, lo que aumenta aún más los costos. En los Estados Unidos, los gastos anuales relacionados con la UPP ascienden a miles de millones de dólares. Las UPP también alargan las estadías hospitalarias y aumentan las tasas de readmisión, lo que agrega más presión a los sistemas de atención médica (Abdullah et al., 2023, citado en Tian & Bian, 2025). Los tratamientos convencionales para las úlceras por presión (UPP) incluyen alivio de la presión (p. ej., reposicionamiento y superficies de apoyo especializadas), apósitos para heridas e intervenciones farmacológicas (BoykoTatiana et al., 2018). Si bien estos métodos pueden reducir el dolor y ayudar a prevenir infecciones, a menudo implican una larga duración del tratamiento, una eficiencia limitada y resultados bajos en las tasas de curación. El alivio de la presión es esencial pero difícil de implementar completamente para pacientes con inmovilidad prolongada, lo que limita su éxito general. Los apósitos húmedos tradicionales, aunque útiles, conllevan un riesgo de infección y pueden ser contraproducentes en la regeneración de tejidos. Los tratamientos farmacológicos pueden controlar los síntomas y aliviar el dolor, pero su impacto en la cicatrización de heridas suele ser lento, con la preocupación adicional de una posible resistencia a los medicamentos. Estas limitaciones resaltan los desafíos de las estrategias actuales de manejo de UPP en la práctica clínica, lo que dificulta lograr una resolución completa de la herida. La necesidad de materiales y métodos más avanzados y efectivos para la prevención y el tratamiento de la UPP es clara. Investigaciones recientes apuntan al potencial de los materiales biomédicos como una solución prometedora para mejorar los resultados de la UPP. (Abdullah et al., 2023, citado en Tian & Bian, 2025) . Las innovaciones en biomateriales han introducido nuevos enfoques para manejar estas heridas desafiantes. Por ejemplo, los biomateriales pueden acelerar la cicatrización de heridas, prevenir infecciones y mejorar tanto la velocidad como la calidad de la regeneración de tejidos. (Deng et al., 2022) ; (Nguyen et al., 2023). El uso de biomateriales biocompatibles y proregenerativos está emergiendo como una estrategia altamente efectiva para mejorar los resultados del tratamiento contra UPP. Los estudios demuestran que la incorporación de biomateriales en los protocolos de tratamiento de UPP mejora significativamente la eficacia en comparación con los métodos convencionales. Estos materiales no solo promueven una curación más rápida a corto plazo por hecho se ser materiales compartibles con la piel , sino que también brindan beneficios economicos a largo plazo, reduciendo los costos del tratamiento y mejorando la calidad de vida de los pacientes.(Pan et al., 2023).

1.1 Optimización en el diseño

Actualmente los colchones para prevención de UPP pueden prevenir la aparición de heridas por fricción o roce durante un tiempo en la cama. Ejemplo actualmente existen colchones de burbujas de aire los cuales están conectados a un compresor que ajusta el inflado y el desinflado secciones del colchón lo que proporciona un efecto de masaje y previene la etapa I de las llagas de decúbito. Los colchones ventilados compuestos de espuma de poliuretano están hechos de espumas de diferentes densidades para las áreas de la cabeza, tronco-pelvis y pies, respondiendo a las demandas específicas de comodidad, soporte y prevención de úlceras por presión. Elegir entre forma truncada, piramidal u ovoide de espuma también puede marcar diferencias notables. Pero para una rehabilitación adecuada, podría ser conveniente que el colchón sea resistente al agua y transpirable (no condensa la humedad), lo que es difícil de combinar en un solo producto. Entonces, ¿Las estructuras porosas Lattice podrían ser la respuesta correcta a la problemática de UPP?; Las estructuras Lattice gyroid son una microestructura porosa, liviana y avanzada que se encuentra en la naturaleza. No presenta juntas ni discontinuidades, lo que permite una gran permeabilidad unificada al aire y al líquido y distribuye la concentración de tensión por igual en todas las direcciones. Gracias a la impresión 3d hoy en día podemos recrear dichas estructuras y explotar el potencial completo de las estructuras Lattice obteniendo muchos beneficios y un amplio espectro de aplicaciones, aunque comúnmente se usa como estructura de relleno en piezas impresas en 3D porque es una estructura casi isotrópica, lo que significa que es igualmente resistente a las fuerzas provenientes de todas las direcciones, no necesita soportes, las estructuras periódicas inspiradas en la naturaleza son autoportante lo que las hace ideales especialmente para la fabricación modelado por deposición fundida , otro beneficio es el peso reducido, por ejemplo un 30% más ligero que los panales convencionales. Además, con un menor consumo de material y mejora en el rendimiento de tiempos de impresión por último se obtiene como resultado un gran flujo de humedad y aire por su diseño poroso el cual permite una distribución unificada en todas las direcciones.(Bavčić, 2021).

Por lo tanto, se propone una estructura Lattice impresa en tercera dimensión para ser el núcleo de una colchoneta medica diseñada para la prevención de UPP utilizando las propiedades de soporte, distribución de peso y ventilación la cual ayuda a para reducir la humedad y favorecer la regeneración tisular.

1.2 Biocompatibilidad ideal de los materiales

Las propiedades antibacterianas y antiinflamatorias de los nanomateriales desempeñan un papel clave en la promoción de la reparación y regeneración tisular. Además, los apósitos que incorporan nanomateriales ofrecen características favorables como conformabilidad, absorbencia y transpirabilidad, que ayudan a mantener la humedad óptima de la herida y crean un entorno ideal para la cicatrización. La matriz extracelular (MEC) es una red compleja y dinámica que rodea las células, compuesta por proteínas estructurales, polisacáridos y moléculas bioactivas (Karamanos et al., 2021). Sus componentes clave incluyen colágeno, fibronectina y elastina, que proporcionan soporte estructural y mecánico; polisacáridos como los glicosaminoglicanos sulfatados y ácido hialurónico, que contribuye a la hidratación y a la organización de la matriz; y moléculas bioactivas como factores de crecimiento y moléculas de adhesión celular, que regulan el comportamiento celular y la función del tejido.(Abdullah et al., 2023, citado en Tian & Bian, 2025) . Los biomateriales basados en MEC imitan la estructura y funciones biológicas de la piel nativa, creando un entorno ideal para la reparación de heridas. Los estudios demuestran que los sustitutos de piel basados en MEC pueden acelerar significativamente la

cicatrización de las UPP al actuar como andamios estructurales para las células y al suministrar una amplia gama de factores de crecimiento y moléculas de señalización. Estos elementos estimulan la migración y proliferación celular, promoviendo la reconstrucción del tejido (Diller y Tabor, 2022). Los avances recientes en ingeniería de tejidos han introducido enfoques innovadores, particularmente a través del uso de nanobiomateriales, para mejorar el proceso de cicatrización. En este contexto según (Nosrati, H. & Heydari, M. ,2025); Las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO2 NPs) han atraído atención debido a sus excelentes propiedades biológicas, incluyendo propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Además, estas nanopartículas pueden ser modificadas para potenciar sus beneficios terapéuticos. Andamios y apósitos que contienen nanopartículas de TiO2 han demostrado resultados prometedores en la aceleración de la cicatrización y la mejora de la regeneración tisular. Propiedades biológicas de las NPs de TiO2 para aplicaciones en la cicatrización de heridas Los prometedores resultados obtenidos de estudios sobre las propiedades biológicas de las NPs de TiO2 han establecido una creciente tendencia de interés en explorar su potencial para mejorar el proceso de cicatrización de heridas.Las NPs de TiO2 poseen propiedades antioxidantes, protegiendo la herida del estrés oxidativo y proporcionando un ambiente deseable para el progreso del proceso de cicatrización. Aunque la inflamación es una parte natural y necesaria de las etapas iniciales de la cicatrización de heridas, la inflamación prolongada puede interrumpir este proceso, lo que podría conducir a complicaciones y retrasar la formación de nuevo tejido. Los estudios han demostrado la actividad antiinflamatoria de las NPs de TiO2. Esto podría apoyar el progreso oportuno del proceso de cicatrización de heridas y mejorar los resultados generales de la curación. Además, las NPs de TiO2 tienen propiedades antimicrobianas, inhibiendo de manera efectiva el crecimiento de una amplia gama de microorganismos. Esta característica podría potencialmente ayudar en la prevención de infecciones, promoviendo así una cicatrización más rápida y eficiente. La síntesis de NPs de TiO2 típicamente implica la reducción de precursores de titanio utilizando agentes reductores naturales, que también funcionan como agentes estabilizantes para reducir la aglomeración. Una variedad de estudios ha demostrado la exitosa síntesis de NPs de TiO2 utilizando extractos de plantas. Por ejemplo, se ha reportado la síntesis de NPs de TiO2 utilizando extractos de hojas de Phyllanthus niruri, cáscaras de Annona squamosa, raíces de Kniphofia foliosa y flores de Caesalpinia pulcherrima. En este contexto se realizó una prueba de biofilm bacteriano la cual indicó la capacidad del apósito impreso en 3D de inhibir la formación de biofilm. Adicionalmente, el apósito mostró una buena biocompatibilidad y aceleró significativamente la cicatrización de heridas por escisión en ratones BALB/c, lo que sugiere que el apósito impreso en 3D desarrollado es un candidato prometedor para el tratamiento eficaz de heridas.A pesar de todos los esfuerzos, sigue existiendo una cantidad significativa de incertidumbre en torno a la toxicidad de las NPs de TiO2. Esta incertidumbre surge de la complejidad de los sistemas biológicos y del desafío de predecir cómo interactuarán las NPs de TiO2 con ellos. Esto subraya la importancia de llevar a cabo más investigaciones para comprender de manera integral y mitigar los posibles riesgos asociados con estos nanomateriales. (Nosrati, H. & Heydari, M. ,2025).

Este documento exploro los conocimientos frontera de ingeniería tisular y biomateriales, por lo que se concluyó primordial el uso de materiales biocompatibles en el diseño y producción de estructuras Lattice basadas en la naturaleza y modelos matemáticos se logro obtener un diseño propio ideal para la prototipar una colchoneta medica la cual ayude a la prevención de UPP y en caso de ya existir UPP, nuestra colchoneta seria la alternativa más optima ya que por las propiedades del instrumento promueve la regeneración de las UPP, esto fundamentándonos en las dichas investigaciones recientes para el desarrollo de una solución en la prevención y el tratamiento de las UPP , el uso de nuestra colchoneta no debe ser usada como una medicina ni tratamiento a las UPP, es un instrumento y/o dispositivo biomédico para el área de trabajo y atención al paciente con UPP. Nuestro objetivo es brindar opciones dentro del ámbito de la ingeniería biomédica para la prevención y tratamiento eficiente del paciente basado en evidencia científica y logrando el poder ofrecer información valiosa para futuras investigaciones y el auxilio tecnológico al área de la salud.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este proyecto combinó el enfoque de investigación teórica junto al diseño y la simulación digital mediante el software SolidWorks además por último se recurrió a la validación experimental real del primer prototipo de la estructura Lattice para ser utilizada en pacientes con UPP como instrumento especializado en lugar de los instrumentos tradicionales, se enfatiza el uso de biomateriales así como, idealmente recubrimiento de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) en toda la superficie de la colchoneta utilizando el mejor método de adherencia al alcance esto proporciona de biopropiedades regenerativas, antisépticas y fotocatalíticas a la propuesta ideal de diseño en este artículo, esto para garantizar los resultados ideales de la colchoneta de prevención de UPP.

2.1 Desarrollo del diseño estructural lattice utilizando SolidWorks

Para el modelado se utilizó el software SolidWorks 2024, donde se diseñó una estructura base, tipo lattice octeto panal por su alta relación resistencia al peso, su comportamiento casi isotrópico y capacidad de distribuir uniformemente las cargas, son los factores esenciales para reducir los puntos de presión (Bavčić, 2021). Por lo tanto, los parámetros métricos y geométricos de nuestro modelo son los siguientes tomando como referencia espacial el mismo punto de origen, en ese contexto en la estructura padre, se usaron las medidas de 30mm de diámetro con una extracción de corte central de diámetro de 24.14mm, cada lado del octeto mide 10mm lo que en conjunto nos da una estructura con un grosor de 2.93mm por último se ajustó la profundidad del octeto a una medida de 11mm , esto para obtener las óptimas propiedades de distribución de peso, soporte y ventilación sin enfoque en el ahorro material de producción.

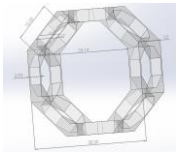


Fig. 1. Diseño padre propuesto de la estructura lattice propia e ideal.

Además, en cada una de las caras del octeto se extruyo un corte con origen central a la cara correspondiente, junto con el mismo patrón de octeto cuyas medidas son de 5mm de radio obteniendo un diámetro de 10mm, tomando como origen el centro de la cara. Además, cada lado de dicho octeto tiene una medida de 4.14mm, se respetó la profundidad del octeto padre cuyas medidas son de 3.79mm e profundidad por 11mm de altura.

Fig. 2. Medidas de las extracciones octagonales laterales

Una vez teniendo nuestra estructura base procedimos a multiplicarla de manera simétrica, esto con el fin de aprovechar las propiedades de una estructura lattice en la distribución de peso y la optimización de la ventilación a través de ella, se multiplico la estructura padre un total de 64 veces ensambladas simétricamente, esto para garantizar la eficiencia de la estructura, las medidas finales de nuestro diseño prototipo son de 126.86mm por 126.86mm y 44mm de profundidad. Por último, el software utilizado no tiene biomateriales ideales así que entre las opciones de materiales disponibles en el software SolidWorks 2024, se optó por elegir el plástico ABS PC con el fin de obtener un estándar.

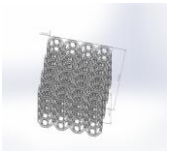


Fig. 3. Diseño prototipo final de Estructura lattice propia e ideal.

2.2 Simulaciones

Se realizaron simulaciones en SolidWorks-Simulation, esto para evaluar el comportamiento estructural de la distribución del peso, resistencia mecánica, recuperación elástica, la humedad y ventilación. Estas simulaciones son preliminares ya que nos permiten ajustar los parámetros geométricos matemáticos para validar la viabilidad del diseño antes de la fabricación en físico. A continuación, se presentan las simulaciones preliminares del análisis estático de tensión, desplazamiento estático y deformación de nuestra estructura.

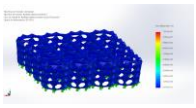


Fig. 4. Simulación de análisis estático tensión nodal realizada en SolidWorks

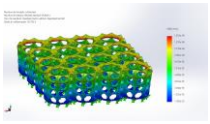


Fig. 5. Simulación del deslizamiento estático realizado en SolidWorks

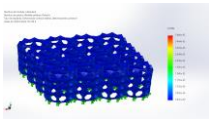


Fig. 4. Simulación deformación estática unitaria realizada en SolidWorks

Los resultados de nuestras simulaciones se apegan a la teoría investigada no obstante el diseño y materiales usados en dichas simulaciones fueron preliminares no obstante nos permitieron establecer un punto de partida para las futuras validaciones experimentales.

2.3 Impresión del primer prototipo de estructura lattice

Primeramente para la impresión 3d de la estructura lattice se recurrió a un taller de impresiones local en donde nos ofrecieron su catálogo de materiales, entre los cuales se optó por elegir el Poliuretano termoplástico (TPU), basado en poliéster de adipato de 1,4-butanodiol y 4,4′-diisocianato de difenilmetano (MDI), este al ser su material más optimo en propiedades biocompatibles y al no crear reacciones en contacto con el medio tisular se justifica la utilización de este material preliminar, además de propiedades flexibles y de casi nula retención de humedad encajan en el perfil de propiedades biocompatibles ideales para el núcleo de la colchoneta de prevención de UPP. Una vez elegido el material de impresión se mandó nuestro diseño en el formato .3mf; En respuesta nos rediseñaron la estructura ideal ya que sus máquinas dicen ser tan precisas por que se optó por simplificar el diseño y usarlo como prototipo inicial y proseguir con la validación experimental.

Fig. 5. Primer prototipo del núcleo impreso en TPU

2.4 Experimentación

Materiales:

- 1 sensor de fuerza resistivo: SEN-09375
- 5 cables
- 1 protoboard
- 1 Arduino uno con cable
- 1 termómetro corporal
- 1 colchoneta hospitalaria tradicional
- 1 cama con colchón normal
- 1 estructura lattice impresa en 3d con TPU

Experimentación de temperaturas: Se colocó el termómetro corporal entre una persona y cada una de las superficies a

comparar, con el fin de determinar en cual la temperatura promedio es más baja y cuyos resultados fueron, colchoneta tradicional: 36 °C, Cama: 35.1 °C , mientras que la estructura impresa mantuvo la temperatura notablemente más baja con: 33 °C, por lo que valida la propuesta de combinar materiales con patrones que favorecen la ventilación y dispersión de calor corporal.

Fig. 6. Evidencia de medición de temperatura entre paciente y colchoneta hospitalaria tradicional

Fig. 7. Evidencia de medición de temperatura entre paciente y cama con colchón normal

Fig. 8. Evidencia de medición de temperatura entre paciente y la estructura lattice impresa en 3d con TPU

Seguido de la experimentación mas importante en nuestro proyecto, la validación experimental de dispersión de presión para lo cual se armó un circuito en Arduino con la configuración básica de sensor SEN-09357 el cual es un sensor que mide la fuerza existente entre 2 objetos en este caso el paciente y las diferentes superficies a comparar en donde se utilizó el siguiente código.

Fig. 9. Código Arduino para configuración básica del circuito utilizando el sensor SEN-09357

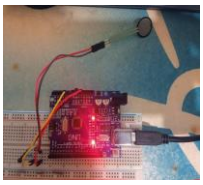


Fig. 10. Configuración básica del circuito Arduino para el sensor SEN-09357

Fig. 11. Evidencia de medición de distribución de fuerza en la colchoneta hospitalaria tradicional

Fig. 12. Evidencia de medición de distribución de fuerza en una cama con un colchón normal

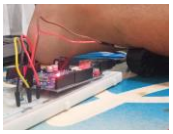


Fig. 13. Evidencia de medición de distribución de fuerza en la estructura lattice impresa en TPU

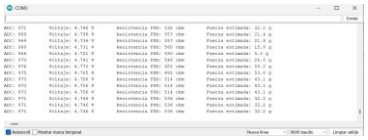


Fig. 14. Mejores resultados obtenidos en la medición de fuerza obtenidos por la estructura Lattice impresa en TPU

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Tabla 1. Tabla comparativa de resultados

Tipo de superficie	Temperatura °C	Distribución de Presión
Colchoneta Hospitalaria Tradicional	36 °C	Mínimo
Cama con colchón normal	35.1 °C	Moderado
Estructura impresa en TPU	33 °C	Optimo Homogéneo

Aunque por los resultados de distribución de peso se podria llegar a la falsa conclusión de que una cama normal puede funcionar en pacientes con UPP pero esto es erróneo ya que aunque si es más cómoda que una colchoneta hospitalaria tradicional los materiales óptimos en la regeneración tisular e incluso podría ser anti producente por las dificultades de ventilación e higiene, también en la tabla se puede observar que la colchoneta hospitalaria al ser de materiales fáciles de esterilizar también retienen el calor corporal por lo que también es anti producente en la prevención de UPP , por lo que la propuesta de una estructura impresa en TPU-MDI al no crear reacción con la piel y lograr la dispersión de presión y calor corporal esperando garantizar la regeneración tisular

4. CONCLUSIONES

En conclusión, la propuesta de una colchoneta médica con un núcleo estructural basado en las estructuras geométricas lattice encontradas en la naturaleza se pueden utilizar para dotar a la colchoneta sus propiedades en distribución de peso y calor además de favorecer la ventilación lo que estimula la regeneración tisular en ares afectadas por las UPP, entonces utilizando las herramientas de impresión en 3D con materiales biocompatibles se puede ofrecer una propuesta de diseño y primer prototipo de colchoneta medica impresa en Poliuretano termoplástico (TPU), basado en poliéster de adipato de 1,4-butanodiol y 4,4′-diisocianato de difenilmetano (MDI) y sustentada por su respectiva validación experimental, idealmente se propone un recubrimiento de TiO_2 para garantizar resultados ideales en la prevención de UPP.

REFERENCIAS

Bavčić, H. (2021). Gyroid breathable mattress. Concept from BA thesis, Product Design Department – Academy of Fine Arts Sarajevo. Mentor: Prof. Jasna Mujkić. Behance.https://www.behance.net/gallery/129367179/Healthcare-gyroid-mattress-3D-printed-foam

Deng, G. L., Lei, Y. L., Tan, H., Geng, B., and Liu, Z. (2024). RETRACTED: Effects of predictive nursing interventions on pressure ulcer in elderly bedridden patients. *Int. Wound J.*, 21(3), e14690. doi:10.1111/iwj.14690

Deng, X., Gould, M., and Ali, M. A. (2022). A review of current advancements for wound healing: biomaterial applications and medical devices. *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomaterials*, 110(11), 2542–2573. doi:10.1002/jbm.b.35086

Diller, R. B., and Tabor, A. J. (2022). The role of the extracellular matrix (ECM) in wound healing: a review. *Biomimetics*, 7(3), 87. doi:10.3390/biomimetics7030087

Hajhosseini, B., Longaker, M. T., and Gurtner, G. C. (2020). Pressure injury. *Ann. Surg.*, 271(4), 671–679. doi:10.1097/sla.0000000000003567

Hu, Y.-Z., Wang, L., Cao, Z.-D., and Wang, Y. (2020). The incidence of pressure ulcer in the elderly in China between 2009 and 2019: a meta-analysis. *Med. Data Min.*, 3(3), 110–118. doi:10.53388/mdm2020093002

Malone, M., and Schultz, G. (2022). Challenges in the diagnosis and management of wound infection. *Br. J. Dermatol.*, 187(2), 159–166. doi:10.1111/bjd.21612

Nosrati, H., and Heydari, M. (2025). Titanium dioxide nanoparticles: a promising candidate for wound healing applications. *Burns & Trauma*, 13, tkae069. https://doi.org/10.1093/burnst/tkae069

Qian, L., Yan, S., Ting, S. T., Han, Z. M., and Qi, T. (2024). Complications and psychological impact of pressure ulcers on patients and caregivers. *Int. Wound J.*, 21(4), e14836. doi:10.1111/iwj.14836

Sprigle, S., McNair, D., and Sonenblum, S. (2020). Pressure ulcer risk factors in persons with mobility-related disabilities. *Adv. Skin Wound Care*, 33(3), 146–154. doi:10.1097/01.asw.0000653152.36482.7d

Tian, S., and Bian, W. (2025). Advanced biomaterials in pressure ulcer prevention and care: from basic research to clinical practice. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 13. https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1535588

Wei, M., Yang, D., Chen, L., Wu, L., Jiang, Q., Niu, N., et al. (2021). The prevalence and prevention of pressure ulcers: a multicenter study of nine nursing homes in eastern China. *J. Tissue Viability*, 30(1), 133–136. doi:10.1016/j.jtv.2020.07.005

Processing of Electromyographic Signals in Lower Limbs of Patients with Some Degree of Spasticity

Chávez Báez, Marco Vinicio*. Morales Colorado, José Luis*. Pérez Juárez, Erik*. García Ramírez, María del Carmen*. Fraga Aguilar, Miguelangel*. Morales Cervantes, Antony*.

**Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, México, 58120 (e-mail: {marco.cb, M16120442, D24121504, maria.gr, miguelangel.fa, antony.mc}@morelia.tecnm.mx).*

Abstract: Electromyography (EMG) provides valuable insights into neuromuscular activity by analyzing the electrical signals generated during muscle contractions. This work presents a methodology for processing and classifying EMG signals from the lower limbs to distinguish different muscle states under controlled conditions. Signals were acquired from four healthy subjects using a custom acquisition system, and a subject independent validation strategy was implemented to ensure reliability and avoid data leakage. Several supervised machine learning models were trained to differentiate resting and isometric contraction states, achieving consistent performance across evaluation schemes. The results highlight the feasibility of using EMG based classification approaches for muscle state recognition and demonstrate the potential of machine learning techniques for robust EMG signal interpretation. This study contributes to the development of reliable processing methodologies applicable to the study of spasticity-related muscle behavior.

Keywords: Electromyography, Signal processing, Machine learning, Supervised classification, Cross-validation

1. INTRODUCTION

Spasticity is a common motor disorder associated with neurological lesions, characterized by abnormally increased muscle tone and exaggerated stretch reflexes. In Mexico, around 4.9% of the population more than six million people live with some type of disability, with motor disability being the most frequent form (INEGI, 2020; Gobierno de México, 2013). Among these, it is estimated that approximately 500,000 individuals live with cerebral palsy, of whom nearly 60% present a spastic condition (SinEmbargo, 2011). Although spasticity has been widely studied from a clinical perspective, mainly through scales such as the Modified Ashworth Scale, quantitative analysis based on electromyographic (EMG) signals remains an emerging field. Electromyography (EMG) is a widely used technique for analyzing the electrical activity of muscles, providing essential information on neuromuscular function (Del Vecchio et al., 2020; Gila et al., 2009). EMG signal processing has been extensively studied for applications ranging from motor control research to biomedical signal analysis. By extracting relevant features, EMG signals can be classified into different patterns, allowing the evaluation of muscle activation strategies under controlled conditions (Karnam et al., 2021; Alkan and Günay, 2012). In particular, applying signal processing techniques and supervised machine learning algorithms to differentiate muscle states such as rest, isometric contraction without load, and isometric contraction with load offers a promising but relatively unexplored approach compared to other EMG applications such as prosthetic control or human machine interfaces. Several studies have also explored the behavior of surface EMG signals in relation to muscle torque and activation characteristics. For example, (Karlsson and Gerdle 2001) demonstrated that both the mean frequency and amplitude of the quadriceps EMG increase with greater torque levels, highlighting the potential of EMG features to describe muscle effort. Similarly, (Li et al. 2020) employed random forest algorithms combined with principal component analysis to estimate knee movements from surface EMG signals, illustrating the relevance of integrating signal processing and machine learning techniques for biomechanical estimation. Recent works emphasize the importance of robust EMG signal processing methods to address noise, variability, and inter-subject differences (Simić and Stojanović, 2024). Ensuring the reliability of classification algorithms requires experimental designs that prevent data leakage and guarantee subject independence. Therefore, EMG signals in this study were acquired from four healthy subjects, applying a subject-independent cross-validation strategy in which three participants were used for training while the remaining subject was exclusively assigned for testing, rotating this scheme across all cases. Additionally, a five-fold cross-validation was applied within the training sets to reinforce the robustness of the evaluation. The classification algorithms implemented were logistic regression, support vector machines (SVM), random forest, neural networks, and XGBoost. Model performance was evaluated using accuracy, precision, recall, F1-score, and the area under the ROC (Receiver Operating Characteristic) curve.

2. METHODOLOGY

An experimental study was conducted to analyze electromyographic (EMG) signals in leg muscles of healthy subjects. The main objective was to evaluate characteristic features of EMG signals and classify them using machine learning algorithms. The study included four healthy subjects, and three leg muscles were evaluated: vastus medialis, rectus femoris, and vastus lateralis. Each muscle was measured under three conditions: at rest, during isometric contraction without weight, and during isometric contraction with a 4 kg weight to simulate spasticity. This design allowed the analysis of muscle activity under different functional states and provided data to train and validate classification models. For the acquisition of EMG signals, the MyoWare 2.0 sensor was used along with an ESP32 microcontroller, which handled data acquisition and transmission to MATLAB for processing. Three electrodes were placed on each muscle, with one positioned over the knee bone and the other two over the muscle belly. MATLAB was employed for signal processing, feature extraction, and machine learning model implementation. The combination of this hardware and software provided accurate EMG signal capture and analysis in a controlled laboratory environment.
Electrodes were carefully positioned to ensure proper muscle activation detection. The first electrode was placed over the knee bone as a reference, while the second and third electrodes were positioned over the target muscle (vastus medialis, rectus femoris, or vastus lateralis). This configuration allowed reliable measurement of muscle electrical activity and minimized interference from neighboring muscles. Each subject underwent ten measurements per muscle for each condition. Every measurement lasted five seconds, resulting in a total of 360 EMG signals. This acquisition protocol ensured sufficient data for statistical analysis and machine learning training, capturing both resting and active muscle states.

2.1 Signal Processing

The acquired EMG signals were processed in MATLAB, where characteristic features were extracted from each signal. These features were organized into tables to facilitate analysis and subsequent classification. The processing stage included visualization and verification of signal quality, ensuring that the dataset was consistent and suitable for machine learning applications.

2.2 EMG Signal Features

Several characteristic parameters were extracted from the EMG signals to quantify muscle activity.

DASDV (Differential Absolute Signal Smoothness)

$$LDASDV = log\left(\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}(X_{i+1}-X_i)^2}\right) \quad (1)$$

Where,
N: number of samples.
X_i: EMG signal at sample i.
Equation (1) defines DASDV, which reflects short-term signal variability and is sensitive to abrupt changes in muscle activation.

IEMG (Integral of EMG)

$$iEMG = \sum_{i=1}^{N}|X_i| \quad (2)$$

Where,
N: number of samples.
X_i: EMG signal at sample i;
Equation (2) represents the Integral of EMG, quantifying total muscle activity during the measurement period.

MAV (Mean Absolute Value)

$$MAV = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|x_i| \quad (3)$$

Where,
N: number of samples.
X_i: EMG signal at sample i.
Equation (3) provides the Mean Absolute Value, describing the average amplitude of the EMG signal.

RMS (Root Mean Square)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X(i)^2} \quad (4)$$

Where,
N: number of samples.
X_i: EMG signal at sample i.
Equation (4) measures the Root Mean Square, associated with signal power and muscle contraction intensity.

SSC (Slope Sign Changes)

$$SSC = \sum_{n=2}^{N-1}\delta(n) \quad (5)$$

Where,
δ(n): 1 if slope changes sign at point n, 0 otherwise.
N: number of samples.
Equation (5) counts the number of slope changes in the signal, reflecting activation frequency and potential muscle fatigue.

VAR (Variance)

$$VAR = \frac{1}{N-1}\sum_{I=1}^{N}(X_i-\bar{X})^2 \quad (6)$$

Where,
N: number of samples.
X_i: EMG signal at sample i.
X: mean of signal
Equation (6) valuates the dispersion of the signal around its mean; indicates variability of muscle activity.

VAREMG (EMG-specific Variance)
Measures the dispersion of EMG amplitudes, quantifying the variability in muscle activation levels.

WL (Waveform Length)

$$WL = \sum_{i=2}^{N} |X(i) - x(i-1)| \quad (7)$$

Where,
N: number of samples.
Equation (7) represents the complexity and frequency content of the signal; larger values indicate more rapid changes.

WA (Mean Activity / Willison Amplitude)

$$WA = \sum_{i=1}^{N-1} \delta(|X(i+1) - X(i)| > \theta) \quad (8)$$

Where,
N: number of samples.
θ: threshold for activation; only changes greater than θ are counted as significant events.
Equation (8) gives Willison Amplitude, indicating the number of activations above a threshold θ.

ZC (Zero Crossing)

$$ZC = \sum_{n=1}^{N-1} \delta(n) \quad (9)$$

Where,
N: number of samples.
δ(n): 1 if signal crosses zero between samples n and n+1, 0 otherwise.
Equation (9) counts zero crossings, reflecting frequency content and activation changes.

2.3 Signal Classification

The extracted EMG parameters served as features for the classifiers, allowing the models to distinguish between muscle states: at rest, isometric contraction without weight, and isometric contraction with a 4 kg weighted cuff simulating spasticity. The effectiveness of the classifiers indicates how reliably each muscle state can be identified.

2.3.1 Dataset Division

The dataset was divided into two evaluation schemes. For baseline evaluation using five-fold cross-validation (CV=5), 80% of the data was used for training and 20% for testing, with folds rotated to assess model performance on all data subsets. Additionally, a Leave-One-Subject-Out (LOSO) scheme was employed, where each fold excluded one complete subject, enabling evaluation of model generalization to unseen individuals. This methodology ensured both robust performance assessment and generalizability across subjects.

2.3.2 Models Used

Five machine learning models were implemented for classification: Logistic Regression (LogReg), Support Vector Machine with RBF kernel (SVM-RBF), Random Forest, Multi-Layer Perceptron (MLP), and XGBoost. Each model was trained and evaluated using the extracted EMG features, allowing comparison of classification performance and selection of the most effective algorithm.

2.4 Evaluation Metrics

Model performance was assessed using standard classification metrics. True positives (TP) indicate the number of correctly classified positive samples, false positives (FP) the number of samples incorrectly classified as positive, true negatives (TN) the number of correctly classified negative samples, and false negatives (FN) the number of samples incorrectly classified as negative. From these elements, the metrics were calculated as follows:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (10)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (11)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

$$F1 - score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (13)$$

$$AUC\ (Area\ Under\ the\ ROC\ Curve) = \int_0^1 TPR(FPR)\, d(FPR) \quad (14)$$

Where TPR (True Positive Rate) = Recall and FPR (False Positive Rate) = $\frac{FP}{FP+TN}$. The AUC measures the model's ability to discriminate between classes, providing a comprehensive evaluation of classification performance.
Equations (10) – (13) define the metrics used to evaluate classification models. Accuracy quantifies the overall proportion of correctly classified samples, precision measures how many of the samples predicted as positive were actually positive, recall evaluates the effectiveness in identifying positive cases, and F1-score combines both into a harmonic mean. Finally, Eq. (14) defines the AUC (Area Under the Receiver), which measures the ability of the model to discriminate between classes. Together, these metrics provide a robust framework to assess model performance under both cross-validation and subject-independent conditions.

3. RESULTS AND/OR DISCUSSION

The experimental results are presented in two parts. First, the electromyographic (EMG) signals recorded from the target muscle under three different conditions are shown: at rest, during isometric contraction without load, and during isometric contraction with load. These graphical representations allow the visualization of the variations in signal amplitude (mV) across the recorded samples, which reflect different levels of muscle activation (Karlsson and Gerdle, 2001; Del Vecchio et al., 2020). Figures 1–3 illustrate

the EMG signals corresponding to the three scenarios, showing a clear difference in the amplitude distribution between the resting state and the contraction conditions. Subsequently, the performance of the classification models is analyzed using two validation schemes: cross-validation (CV=5, baseline) and leave-one-subject-out (LOSO). These validation strategies are essential to ensure the robustness and generalization capability of EMG-based classifiers, as inter-subject variability significantly affects model performance (Simić and Stojanović, 2024). Tables 1 and 2 summarize the quantitative results obtained for each model across the considered metrics.

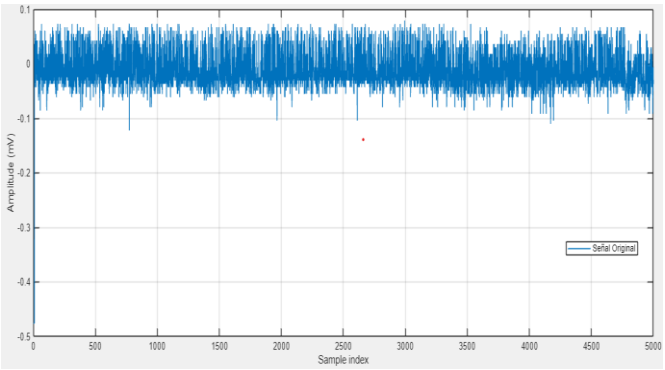


Fig. 1. EMG signal of the vastus medialis muscle at rest (x-axis: sample index; y-axis: amplitude in mV).

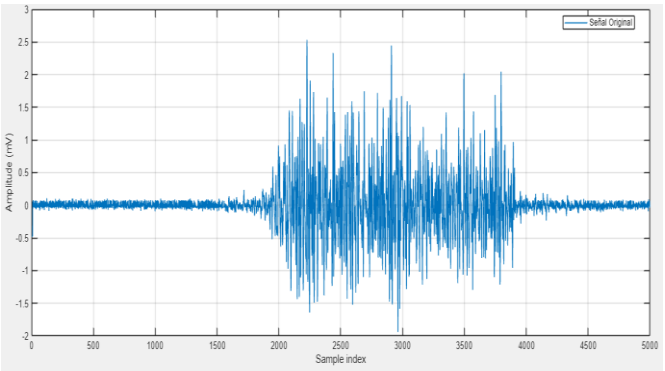


Fig. 2. EMG signal of the vastus medialis muscle during isometric contraction without load (x-axis: sample index; y-axis: amplitude in mV).

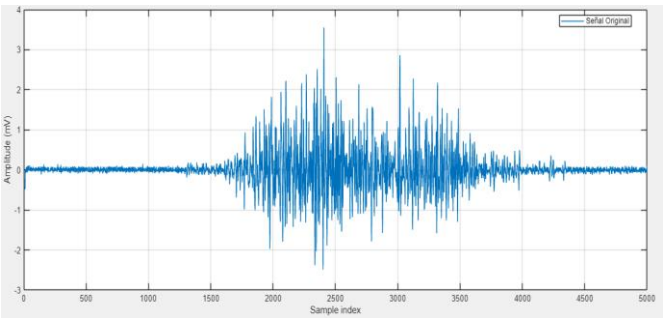


Fig. 3. EMG signal of the vastus medialis muscle during isometric contraction with a 4 kg load (x-axis: sample index; y-axis: amplitude in mV).

Figures 1–3 correspond to the EMG signals recorded from the vastus medialis muscle. In each case, the isometric contraction was performed for approximately 2 seconds, allowing the visualization of the differences in signal amplitude between the resting state, contraction without load, and contraction with load. The performance evaluation of the classification models applied to the EMG signals. The results are organized into two validation approaches: cross-validation (CV=5, baseline) and leave-one-subject-out (LOSO). For each case, the distribution of classes is shown, followed by the average performance metrics across the models considered. Table 1 summarizes the results obtained with cross-validation (CV=5), while Table 2 reports the results using LOSO validation.

Table 1. Classification results with cross-validation (CV=5, baseline)

Model	Accuracy (mean ± std)	F1-macro (mean ± std)	Precision-macro (mean ± std)	Recall-macro (mean ± std)	AUC-macro-ovr (mean ± std)
LogReg	0.7333 ± 0.0360	0.7327 ± 0.0363	0.7331 ± 0.0360	0.7343 ± 0.0361	0.8792 ± 0.0336
SVM-RBF	0.7250 ± 0.0421	0.7229 ± 0.0449	0.7260 ± 0.0434	0.7260 ± 0.0429	0.8842 ± 0.0277
RandomForest	0.7083 ± 0.0340	0.7083 ± 0.0361	0.7087 ± 0.0372	0.7094 ± 0.0358	0.8678 ± 0.0284
MLP	0.7139 ± 0.0362	0.7085 ± 0.0419	0.7100 ± 0.0379	0.7150 ± 0.0377	0.8339 ± 0.0530
XGBoost	0.7167 ± 0.0362	0.7162 ± 0.0351	0.7167 ± 0.0355	0.7179 ± 0.0360	0.8605 ± 0.0220

Table 2. Classification results with LOSO validation (per subject)

Model	Accuracy (mean ± std)	F1-macro (mean ± std)	Precision-macro (mean ± std)	Recall-macro (mean ± std)	AUC-macro-ovr (mean ± std)
LogReg	0.7279 ± 0.0443	0.7136 ± 0.0587	0.7380 ± 0.0494	0.7285 ± 0.0448	0.8713 ± 0.0236
SVM-RBF	0.6890 ± 0.0603	0.6801 ± 0.0625	0.6928 ± 0.0757	0.6906 ± 0.0605	0.8740 ± 0.0208
RandomForest	0.6805 ± 0.0383	0.6724 ± 0.0407	0.6823 ± 0.0457	0.6818 ± 0.0378	0.8549 ± 0.0114
MLP	0.6941 ± 0.0920	0.6830 ± 0.1097	0.6980 ± 0.0960	0.6952 ± 0.0924	0.8178 ± 0.0394
XGBoost	0.6777 ± 0.0254	0.6727 ± 0.0214	0.6798 ± 0.0281	0.6792 ± 0.0242	0.8585 ± 0.0252

According to the classification algorithms applied in this baseline study, the best performance was achieved by Logistic Regression and Support Vector Machine (SVM), reaching accuracies around 73% and area under the curve (AUC) values of approximately 87%. Similar results have been reported in previous studies where linear and kernel-based methods outperformed other models in EMG classification tasks (Alkan and Günay, 2012; Karnam et al., 2021; Li et al., 2020). Random Forest, Multilayer Perceptron (MLP), and XGBoost exhibited slightly lower performance, with accuracies ranging from 70% to 72% and AUC values between 83% and 86%. These results indicate that linear and kernel-based models were more effective in distinguishing the different EMG signal states under the conditions evaluated. Figures 4 and 5 illustrate the classifiers' performance under five-fold cross-validation. Logistic Regression and SVM achieved the best results, with a macro-AUC of 0.87.

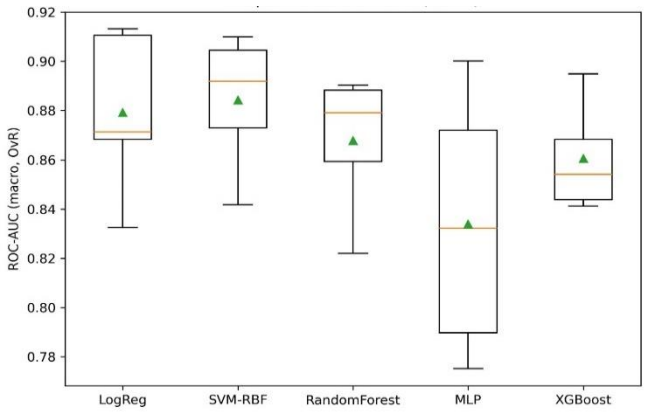


Fig. 4. Box plot of macro-ROC-AUC (CV = 5), showing that the highest accuracies were achieved by Logistic Regression (LogReg) and Support Vector Machine (SVM).

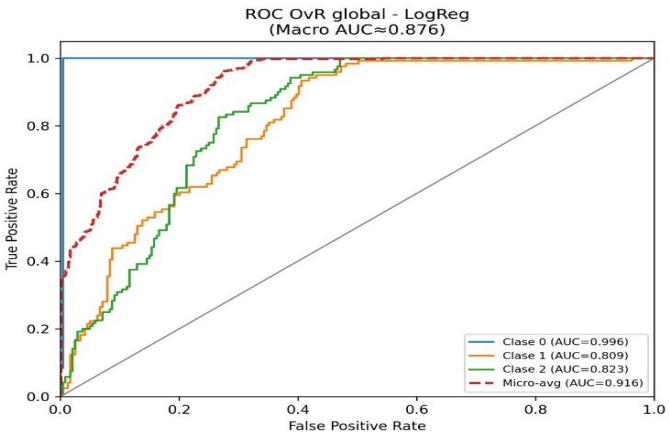


Fig. 5. Overall, one-vs-rest (OvR) ROC curve for Logistic Regression (macro-AUC ≈ 87.6%).

The performance of the classification algorithms was further evaluated using the leave-one-subject-out (LOSO) validation approach. In this scheme, the data from one subject are excluded from the training set and used only for testing, and this process is repeated for each subject. This method allows assessing the models' ability to generalize to new subjects, providing a more realistic evaluation of their performance on previously unseen individuals (Simić and Stojanović, 2024). The generalization capability of the classifiers was further analyzed using the Leave-One-Subject-Out (LOSO) validation. This approach evaluates each model's performance on unseen subjects, ensuring subject independence. Figure 6 summarizes the distribution of macro-ROC-AUC values under LOSO, showing slightly higher variability compared to cross-validation but maintaining consistent results above 70% accuracy.

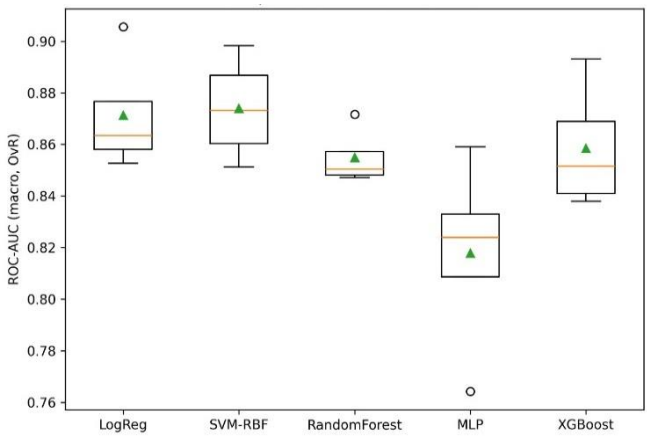


Fig. 6. Box plot of macro-ROC-AUC (LOSO) for each classification algorithm.

Figure 7 illustrates the ROC curve corresponding to the model with the highest accuracy under LOSO validation (Logistic Regression). The curve shows excellent separability between classes 0 (rest), 1 (isometric contraction without load), and 2 (isometric contraction with load), reinforcing the effectiveness of the model for EMG-based classification even when evaluated on new subjects.

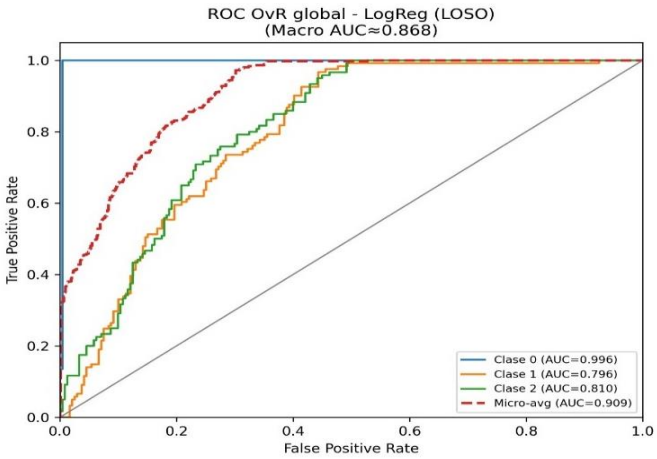


Fig. 7. ROC curve for the classification algorithm with the highest accuracy (Logistic Regression, LOSO).

Confusion matrices (Figs. 8–9) show high accuracy for the resting state, with minor overlap between contraction classes. The confusion matrices show that Logistic Regression accurately distinguishes the resting state (class 0) from contraction states, achieving perfect classification for rest. Some overlap occurs between contractions with and without load, indicating similar signal patterns. The LOSO validation

reveals slightly greater confusion due to subject variability, which is consistent with reports that muscle activation patterns can vary across individuals (Quintão et al., 2021). Overall, the results are promising but preliminary, highlighting the need for a larger dataset to improve generalization and reduce identity leakage.

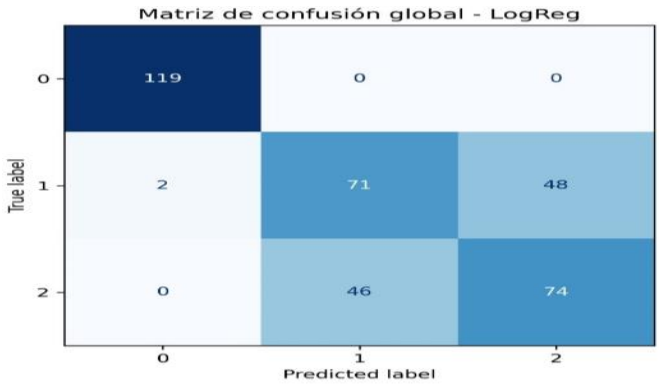


Fig. 8. Confusion matrix showing perfect classification for class 0 (rest) and partial overlap between classes 1 and 2 (contraction with and without load).

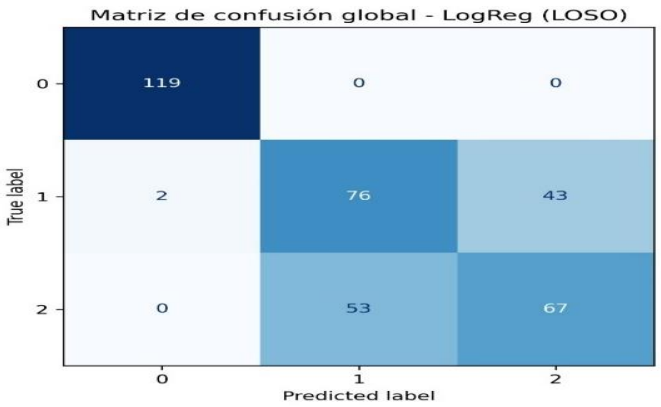


Fig. 9. Confusion matrix under LOSO validation, showing high accuracy (>70%) with some confusion between contraction classes.

4. CONCLUSIONS

This study presented a methodology for processing and classifying surface EMG signals from lower-limb muscles under three conditions: rest, isometric contraction without load, and contraction with a 4-kg load simulating spasticity. Using a subject-independent validation and five supervised classifiers, the results showed that logistic regression and SVM achieved the best performance, with accuracies around 72–73% and AUC values near 0.87. These findings indicate that linear and kernel-based models can effectively distinguish muscle states under the evaluated conditions. Although the approach demonstrated reliable classification, the dataset was limited to four healthy subjects, and the 4 kg load only approximated spastic muscle behavior. Future work should include a larger and more diverse population.

REFERENCES

Del Vecchio, A., Holobar, A., Falla, D., Felici, F., Enoka, R.M. and Farina, D. (2020) 'Tutorial: Analysis of motor unit discharge characteristics from high-density surface EMG signals', *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 53, p.102426.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2020.102426

Gila, L., Malanda, A., Carreño, I.R., Falces, J.R. and Navallas, J. (2009) 'Electromyographic signal processing and analysis methods', *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 32.
Available at: https://doi.org/10.23938/ASSN.0151

Gobierno de México (2013) 'Discapacidad motriz, la de mayor frecuencia en México: ENADID 2014'.
Available at: https://www.gob.mx/ (Accessed: 26 September 2025).

INEGI (2020) *Estadísticas a propósito del Día Internacional de las Personas con Discapacidad*.
Available at: https://www.inegi.org.mx/ (Accessed: 26 September 2025).

Alkan, A. and Günay, M. (2012) 'Identification of EMG signals using discriminant analysis and SVM classifier', *Expert Systems with Applications*, 39(1), pp.44–47. Available at: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.06.043

Karnam, N.K., Turlapaty, A.C., Dubey, S.R. and Gokaraju, B. (2021) 'Classification of sEMG signals of hand gestures based on energy features', *Biomedical Signal Processing and Control*, 70, p.102948.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102948

Karlsson, S. and Gerdle, B. (2001) 'Mean frequency and signal amplitude of the surface EMG of the quadriceps muscles increase with increasing torque: a study using the continuous wavelet transform', *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11, pp.131–141.
Available at: https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00046-8

Li, Z., Guan, X., Zou, K. and Xu, C. (2020) 'Estimation of knee movement from surface EMG using random forest with principal component analysis', *Electronics (Switzerland)*, 9(1), p.43.
Available at: https://doi.org/10.3390/electronics9010043

Simić, M. and Stojanović, G.M. (2024) 'Wearable device for personalized EMG feedback-based treatments', *Results in Engineering*, 23, p.102472.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102472

SinEmbargo (2011) 'En México hay medio millón de personas con parálisis cerebral, 60% con espasticidad'. Available at: https://www.sinembargo.mx/ (Accessed: 26 September 2025).

Quintão, C., Vigário, R., Santos, M.M., Gomes, A.L., de Carvalho, M., Pinto, S. and Gamboa, H. (2021) 'Surface electromyography for testing motor dysfunction in amyotrophic lateral sclerosis', *Neurophysiologie Clinique*, 51(5), pp.454–465.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.neucli.2021.06.001

Prototype of a Wearable Device for Monitoring Oxygenation and Heart Rate in Patients

Serapio Moro Guadalupe Azucena, Pérez Castañeda Oscar Leopoldo, López Clemente Sinaí Guadalupe, Torres Hernández Andrea, Varillas Sánchez Bryan Gustavo

Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico s/n, Colonia Santa María Coapan

Apartado Postal 247C.P. 75770, Tehuacán, Puebla, México (e-mail: L21360204, oscarl.pc, L21360237 , L21360158, L21360243@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: Heart rate is the frequency of heartbeats per minute and is used to assess cardiac function, heart rhythm, and blood circulation. Its measurement is crucial for detecting health problems such as tachycardia or bradycardia, which can indicate heart disease or even cardiac arrest. Oxygenation, on the other hand, is the vital process by which oxygen enters the body's tissues and is essential for cellular metabolism and energy production. Insufficient oxygenation can lead to hypoxemia, a condition that causes symptoms such as shortness of breath, confusion, and cyanosis. Correct interpretation of these parameters is essential for the early detection of potential respiratory and cardiac complications, enabling timely medical decisions to prevent serious consequences and even death. In this context, a prototype noninvasive wearable monitoring device was developed to measure heart rate and blood oxygen saturation, using the MAX30102 sensor. This sensor stands out for its accurate recording capacity and low power consumption, making it ideal for applications in wearable devices. The data obtained is transmitted via an HC-06 Bluetooth module to a smartphone, where an app collects patient information, displays the values in real time, interprets them according to the ranges established by the World Health Organization (WHO), and issues a message indicating whether the results are within normal limits or if conditions such as tachycardia or bradycardia are present. Some of the advantages of this prototype include its Bluetooth connection, which allows for more accessible data transmission; its portable and user-friendly design, as it can be carried with the patient; the ease of generating a diagnosis from the measurements; in addition to offering real-time monitoring, it facilitates remote medical follow-up and contributes to the prevention of complications through early detection of abnormalities. The prototype was specifically designed for people over 12 years of age who require constant monitoring and, in many cases, lack the necessary knowledge to interpret these parameters independently. Finally, the tests were conducted at the Independencia Hospital in Tehuacán, with the participation of adult patients and the support of healthcare personnel.

Keywords: Heart rate, Blood oxygen saturation (SpO_2), Wearable device, MAX30102 sensor, Noninvasive monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización de la frecuencia cardíaca y de la oxigenación desempeña un papel fundamental tanto en la atención médica como en el ámbito deportivo, ya que proporciona información valiosa sobre la salud cardiovascular y el rendimiento físico. Estudios recientes han demostrado la importancia de los sensores de frecuencia cardíaca en la detección del estrés, la ansiedad, la actividad física y el estado de recuperación. De acuerdo con estudios realizados en 2022 por la Secretaría de Salud del Gobierno de México, se concluyó que alrededor de 220,000 personas mueren cada año debido a enfermedades del corazón [1].

Por otro lado, las enfermedades respiratorias constituyen una causa primordial de mortalidad y morbilidad en el mundo. En este contexto, Pérez-Padilla, en su artículo “Muertes de origen respiratorio en México en 2021”, analiza la evolución de las muertes respiratorias entre 2015 y 2021. En 2015 se registraron 79,383 muertes respiratorias, mientras que en 2021 la cifra ascendió a 349,491, evidenciando un incremento considerable debido a la pandemia de COVID-19. Dejando de lado el COVID-19, las causas más comunes de muerte por enfermedades respiratorias fueron la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, la neumonía-influenza, los tumores malignos del tórax, las muertes respiratorias neonatales, los trastornos de la circulación pulmonar, las enfermedades intersticiales, el asma y la tuberculosis. Por lo tanto, se concluye que las enfermedades respiratorias representan una causa significativa de mortalidad en México, tanto en escenarios con pandemia como sin ella, lo que subraya la necesidad de personal capacitado y recursos adecuados para la atención de los pacientes [2].

Estas investigaciones evidencian la importancia y la necesidad de dispositivos de monitoreo para estas enfermedades. En este sentido, se han desarrollado diferentes dispositivos que buscan cubrir esta necesidad en distintos contextos. Por ejemplo, Barrera, L.,et al., muestran como la convergencia entre el Internet de las Cosas (IoT) y las tecnologías de monitorización de la salud permite aplicaciones que van desde la supervisión remota de pacientes hasta el seguimiento del estado físico, fomentando estilos de vida saludables. Además, se plantea

como línea futura la optimización del dispositivo y la mejora de la experiencia del usuario [3].
De manera similar, el proyecto "Heart rate sensor with IoT features" desarrolla un dispositivo de monitoreo de ritmo cardíaco habilitado con IoT, que integra el microcontrolador ESP32, el sensor MAX30102 y una pantalla OLED. Este sistema transmite datos en tiempo real a una página web, permitiendo un seguimiento remoto y accesible. Sus aplicaciones abarcan desde la monitorización de pacientes hasta el control del estado físico personal, evidenciando la convergencia entre IoT y tecnologías de salud, y planteando mejoras futuras en funcionalidad y experiencia de usuario [4].

2. METODOLOGIA

El diagrama de flujo Fig. 1, representa el proceso general del sistema. El procedimiento inicia con la captación de señales mediante el sensor MAX30102, el cual detecta el pulso cardíaco y la saturación de oxígeno. Posteriormente, la información es enviada a un ESP32, donde los datos son procesados y se calculan los valores de BPM y SpO_2. Una vez obtenidos los resultados, estos se muestran en una pantalla OLED, mientras se establece la conexión con un teléfono móvil a través de un módulo Bluetooth. De esta manera, los datos pueden visualizarse en tiempo real, tras lo cual el sistema se detiene y genera un diagnóstico a partir de la frecuencia cardiaca.

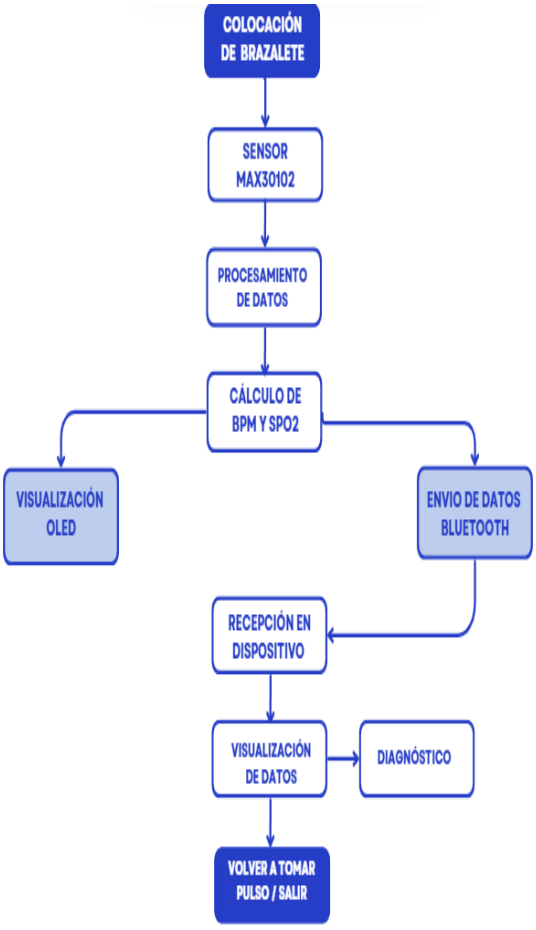


Fig. 1 Diagrama de flujo del proceso general del sistema

El diagrama del sistema es mostrado en la Fig. 2, en el cual se observan los principales componentes utilizados.

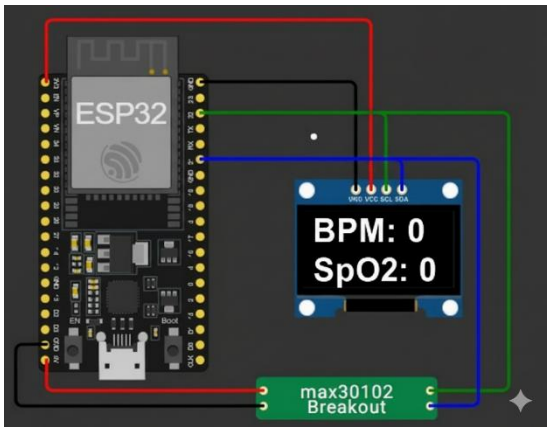


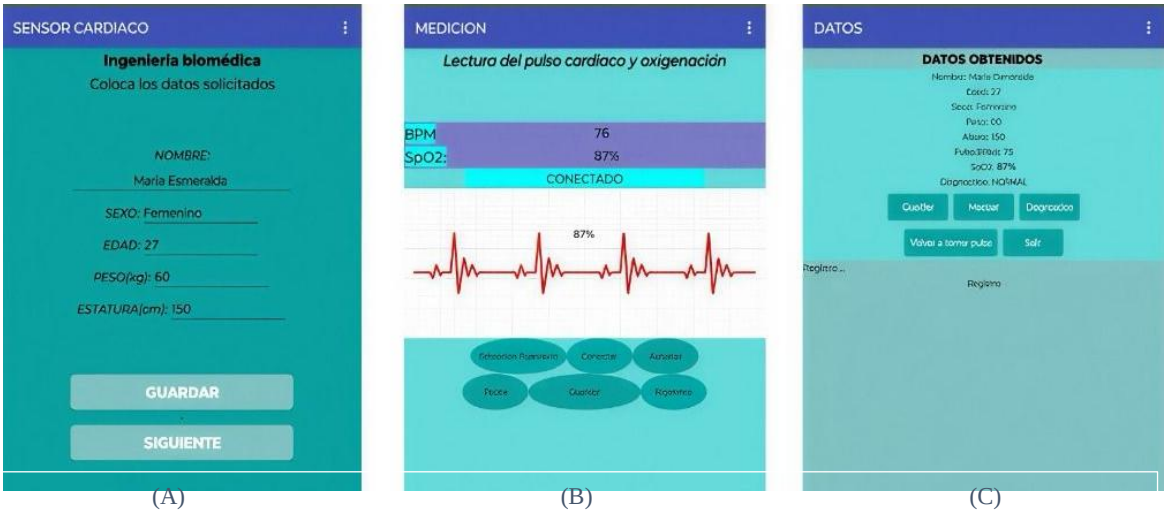
Fig. 2 Simulación del circuito implementado en el simulador Wokwi

Funcionamiento de la App

Para la aplicación se utilizó la plataforma App Inventor, la cual permite desarrollar aplicaciones móviles para Android mediante una interfaz visual basada en bloques. Esta característica la hace accesible y facilita la creación de la interfaz gráfica. Por estas razones se eligió dicha plataforma, en la cual se diseñaron tres ventanas principales.
En la aplicación desarrollada, Fig.3(A), se solicitan los datos del paciente los cuales se almacenan posteriormente. En la segunda ventana (B), se realiza la búsqueda de dispositivos Bluetooth con el fin de vincular el teléfono móvil con el ESP32. Una vez seleccionado en la interfaz, aparece la opción de "conectar", y al hacerlo, se establece la comunicación. A partir de este momento, los datos comienzan a visualizarse tanto en la aplicación como en la pantalla OLED.
Después de transcurrir unos segundos, se espera a que los valores se estabilicen para poder utilizar la opción de "pausa", la cual permite conservar únicamente el valor más adecuado o estable. "Guardar", almacena los valores para mostrarlos posteriormente y generar un diagnóstico en función del rango en el que se encuentren. Al presionar el botón "siguiente", se accede a la última ventana de la aplicación.
En la tercera ventana (C) se muestran los datos personales registrados en la primera etapa, así como las mediciones obtenidas.
La aplicación desarrollada con sensor MAX30102 tiene un funcionamiento a base de fotopletismografía. Los leds emiten luz que atraviesa la piel, y el fotodetector mide la cantidad de luz reflejada por la sangre esto nos ayuda en la monitorización ya que se busca facilitar el monitoreo. El diseño del brazalete se muestra en la Fig.6, el cual corresponde a un dispositivo wearable en forma de reloj inteligente pensado para el monitoreo de dos de los signos vitales más importantes. Se considera un dispositivo wareable porque son equipos electrónicos que se pueden usar en el cuerpo, para recopilar datos y monitorear la salud. La carcasa muestra un acabado compacto y ergonómico, con correa ajustable para colocarse en la muñeca. En la parte superior se aprecia una pantalla digital tipo OLED, la cual despliega en tiempo real las

mediciones del sensor, en este caso la frecuencia cardíaca (BPM) y la saturación cardiaca. La estructura está diseñada para integrar de manera discreta y funcional el circuito, manteniendo un aspecto moderno y portátil.

representa un apoyo valioso para quienes no cuentan con conocimientos especializados. El propósito de este proyecto es que el dispositivo pueda utilizarse en el hogar como una herramienta práctica tanto para los pacientes como para los



(A) (B) (C)

Fig.3 Desarrollo de aplicación

Al ser un dispositivo wearable, el usuario podrá llevar el dispositivo consigo de forma cómoda, lo que facilita la medición continua y no invasiva de parámetros vitales, ideal para aplicaciones de monitoreo remoto de pacientes.

3. RESULTADOS

Las pruebas que se realizaron fueron a pacientes del Hospital Independencia Tehuacán los cuales fueron seleccionados aleatoriamente con características diferentes, ya que los pacientes que tenían alguna enfermedad respiratoria o problemas cardiacos fueron los que ayudaron a tener valores fuera de los rangos normales y así generar diagnósticos variados. Dicho estudio se realizó para conocer la confiabilidad del equipo y los resultados se muestran en la tabla 1 de frecuencia cardiaca y en la tabla 2 de saturación de oxígeno. Las muestras se recolectaron durante dos semanas. Cabe destacar que hubo un margen de error que se obtuvo durante las mediciones debido a que es un sensor que no tiene características de portabilidad como se mencionó anteriormente. Sin embargo, se demuestra que a pesar de no ser un sensor de este tipo puede dar ciertas lecturas sobre ciertos valores biométricos, más adelante se demuestra que a pesar de estas diferencias en número, existe cierta relación en los resultados.

Cabe destacar que las comparaciones fueron realizadas con un Oxímetro VITAL CARE YX100. El personal médico de apoyo fue el encargado de realizar las pruebas a los distintos pacientes del hospital, como se muestra en la Fig. 5. Previamente, se les explicó el funcionamiento del sistema y se solicitó su autorización para compartir algunos datos personales, como nombre, edad y peso, a aquellos que aceptaron participaron en las pruebas. Al finalizar, se les destacó la importancia de interpretar correctamente los parámetros obtenidos y la utilidad de la aplicación, la cual profesionales de la salud, sin necesidad de acudir físicamente al hospital.

En cuanto a la experiencia de uso e interacción con la interfaz, el personal médico considero que la aplicación resulto amigable y sencilla de manejar, de igual forma se facilita interpretar la valoración de los parámetros. Y se consideró como una herramienta potencial para la capacitación de estudiantes y personal sin experiencia previa. No obstante, se hizo énfasis en que las instrucciones de colocación del sensor deberían ser más específicas debido a que la sensibilidad de este fue el principal motivo de variación en las lecturas.

Después de realizar las pruebas con ayuda del personal médico se recabaron los siguientes datos los cuales sirven para ver la comparación entre un oxímetro VITAL CARE YX100 y el prototipo realizado con el sensor MAX30102.Ademas de realizar un análisis mediante el método de error relativo porcentual $\left|\frac{V_a - V_b}{V_b}\right| x\ 100\%$ donde V_a es el valor del pulsioxímetro convencional mientras que V_b es el valor del prototipo.

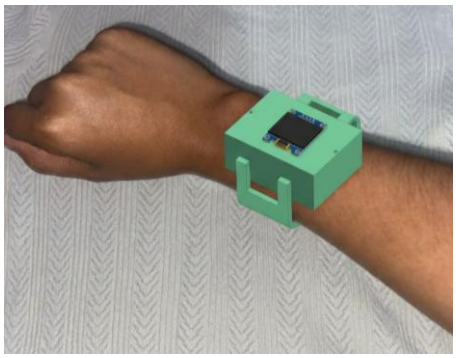


Fig.4 Diseño del brazalete

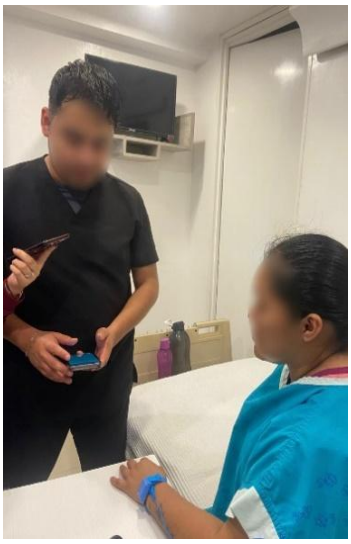


Fig.5 Pruebas de funcionamiento al paciente

Tabla 1. Muestras de saturación de oxígeno

PACIENTES VOLUNTARIAS	PULSIOXÍMETRO CONVENCIONAL	PROTOTIPO	ERROR RELATIVO PORCENTUAL
PACIENTE 1	97%	98%	1.03%
PACIENTE 2	98%	92%	6.12%
PACIENTE 3	96%	93%	3.12%
PACIENTE 4	96%	95%	3.15%
PACIENTE 5	97%	93%	4.12%
PACIENTE 6	93%	89%	4.30%
PACIENTE 7	94%	90%	4.25%
PACIENTE 8	95%	90%	4.75%
PACIENTE 9	96%	97%	1.04%
PACIENTE 10	96%	97%	1.04%
PACIENTE 11	80%	76%	5%
PACIENTE 12	97%	94%	3.09%
PACIENTE 13	75%	77%	2.66%
PACIENTE 14	85%	82%	3.52%
PACIENTE 15	86%	80%	6.97%

Tabla 2. Muestras de frecuencia cardiaca

.

PACIENTES VOLUNTARIAS	PULSIOXÍMETRO CONVENCIONAL	PROTOTIPO	ERROR RELATIVO PORCENTUAL
PACIENTE 1	82	77	6.09%
PACIENTE 2	74	70	5.40%
PACIENTE 3	71	65	8.45%
PACIENTE 4	78	72	7.69%
PACIENTE 5	71	64	9.85%
PACIENTE 6	80	73	8.75%
PACIENTE 7	76	82	7.89%
PACIENTE 8	81	81	0%
PACIENTE 9	79	86	8.86%
PACIENTE 10	86	80	6.97%
PACIENTE 11	89	88	1.12%
PACIENTE 12	100	96	4%
PACIENTE 13	58	60	3. 44%
PACIENTE 14	95	92	3.15%
PACIENTE 15	70	72	2.85%

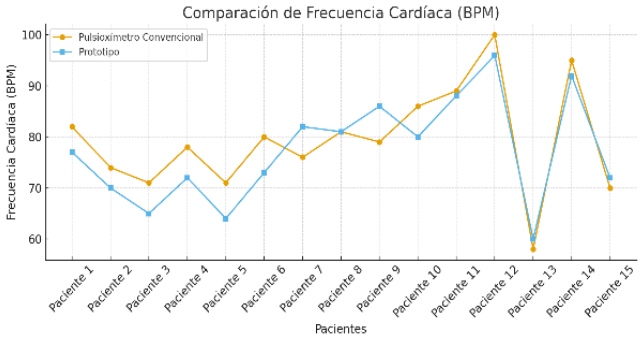


Fig. 6 En esta gráfica se comparan los valores de frecuencia cardíaca obtenidos por ambos dispositivos

Como se observa y se mencionó anteriormente, la variación en la saturación de oxígeno realizando los cálculos del error de relativo porcentual tuvimos un mínimo de 1.03% y un máximo de 6.97% por lo tanto en frecuencia cardiaca tuvimos un mínimo de 0% y un máximo de 8.86% lo que se considera que el prototipo tiene un buen funcionamiento ya que hay que tomar en cuenta que el sensor utilizado en el prototipo no es

un producto médico. A continuación, se muestran en la Fig.6 y Fig.7 las gráficas de los datos recabados.

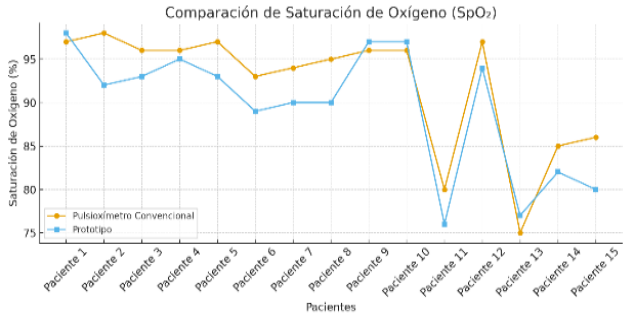


Fig. 7 La gráfica muestra la comparación entre los valores obtenidos con un pulsioxímetro convencional y el prototipo desarrollado.

Así es como se muestran los valores en la pantalla OLED mientras se toman las mediciones con el brazalete. A donde se pueden ver los valores de la saturación de oxígeno y la frecuencia cardiaca Fig.8.

Fig.8 Medición mostrada en OLED

4.CONCLUSIONES

El proyecto demostró la importancia de una adecuada interpretación de los datos y de contar con una interfaz intuitiva y accesible para el usuario. Los resultados obtenidos confirmaron la viabilidad del dispositivo wearable para detectar anomalías en la oxigenación y el pulso cardíaco, evidenciando un bajo porcentaje de error. Además, se identificó la necesidad de adaptar el sistema a usuarios sin experiencia tecnológica, por lo que se propuso incorporar un módulo de audio para personas con limitaciones en la lectura.
A futuro, se plantea optimizar el diseño para hacerlo más ligero, ergonómico y práctico, evitando la rigidez del prototipo actual. De este modo, el dispositivo podría consolidarse como una herramienta confiable y de uso cotidiano, continuando su desarrollo mediante un análisis más profundo que incluya el cálculo de la desviación estándar.

REFERENCIAS

Alnajjar, R. (unpublished). A low-cost, wearable IoT system for comprehensive cardiovascular health monitoring and disease risk prediction.

Amirrudin, N. A., Nazreen, M., Syafiq, M. A., Irwan, M. H., Bolang, F. A., Putra, A. T. A., Ariffin, A., Yusof, K. H. & Sapari, N. M. (2024) 'Heart rate sensor with IoT features', *E3S Web of Conferences*, CONCEPT 2023, 516, artícle 05002.

Barrera, L., Rodríguez, M., Bond, R., Morales, M. & Encinas, D. (s.f.) *Diseño de un oxímetro de pulso. Prototipo de pruebas*. SimHPC-TICAPPS, Universidad Nacional Arturo Jauretche, Argentina. Disponible en: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149426/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1

Contardi, U. A., Morikawa, M., Brunelli, B., & Thomaz, D. V. (2022). MAX30102 Photometric Biosensor Coupled to ESP32-Webserver Capabilities for Continuous Point of Care Oxygen Saturation and Heartrate Monitoring. *Engineering Proceedings*, *16*(1). Available at: https://doi.org/10.3390/IECB2022-11114

Gobierno de México, Secretaría de Salud (s.f.) *Cada año, 220 mil personas fallecen debido a enfermedades del corazón*. Disponible en: https://www.gob.mx/salud/prensa/490-cada-ano-220-mil-personas-fallecen-debido-a-enfermedades-del-corazon

Pérez-Padilla, J.R. (2023) 'Muertes de origen respiratorio en México en 2021', *Neumología y Cirugía de Tórax*, 82(2), pp. 79–83. Disponible en: https://www.medigraphic.com/pdfs/neumo/nt-2023/nt232d.pdf

Prasad, L.S., Ukala, M.K., & Professor, A. (2024). Blood oxygen and heart rate monitor with MAX30100 and Arduino. Available at: http://materialsciencetech.com/mst/

Valenti, S., Volpes, G., Parisi, A., Peri, D., Lee, J., Faes, L., Busacca, A., & Pernice, R. (2023). Wearable multisensor ring-shaped probe for assessing stress and blood oxygenation: Design and preliminary measurements. *Biosensors*, *13*(4). Available at: https://doi.org/10.3390/bios13040460

Vananth, P. N. S., Rajalakshmi, S., & Sathya, P. (2023). Design and demonstration of Arduino based low cost pulse oximeter. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 11, pp. 416–423.

Prototype Development and Pilot Study for Non-Invasive Postprandial Glucose Measurement Using Multicolor Optical Transmission in Dried Saliva Samples with KNN-Based Classification

Sanchez Brito, Miguel 1 *, Sanchez Monroy, Virginia 2 **

** Escuela Superior de Cómputo, Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación, Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México.*

***Salvador Díaz Mirón esq. Plan de San Luis S/N, Miguel Hidalgo, Casco de Santo Tomas, 11340 Ciudad de México.*
(e-mail: {msanchezbr, vsanchezm}@ipn.mx).

Abstract: Accurate, non-invasive assessment of postprandial glucose is critical for metabolic health monitoring. We developed a novel approach using dried saliva samples exposed to multicolor optical illumination (green, blue, white, violet). Light transmitted through the samples was captured with a BH1750 sensor, revealing clear optical signatures distinguishing pre- and postprandial states. A K-Nearest Neighbors (KNN) classifi er eff ectively discriminated between these conditions, demonstrating the potential of this low-cost, rapid, and non-invasive technique as an alternative to traditional blood-based glucose testing. Future developments could enable classifi cation of glucose levels as low, normal, or high, off ering a non-invasive tool for personalized metabolic monitoring.

Keywords:
Non-invasive glucose monitoring, Dried saliva analysis, Multicolor optical transmission, Postprandial glucose assessment, K-Nearest Neighbors classification.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades no transmisibles (ENT), también conocidas como enfermedades crónicas, son afecciones de larga duración que resultan de factores genéticos, fisiológicos, ambientales y conductuales, y afectan a personas de todas las edades en todo el mundo. Las principales ENT incluyen las enfermedades cardiovasculares, el cáncer, las enfermedades respiratorias crónicas y la diabetes. En 2021, la diabetes causó directamente 1.6 millones de muertes, de las cuales el 47% ocurrieron en personas menores de 70 años. En 2022, aproximadamente el 14% de los adultos mayores de 18 años vivían con diabetes, y cerca del 59% de los adultos de 30 años o más con la enfermedad no recibían ningún tratamiento, lo que resalta la necesidad urgente de estrategias efectivas de monitoreo y manejo (Diabetes, s. f.; Enfermedades no transmisibles, s. f.).

Aunque la diabetes no puede curarse, sus efectos sobre la salud pueden mitigarse mediante la adopción de una dieta equilibrada, la práctica regular de actividad física y, de manera crítica, el monitoreo continuo de los niveles de glucosa en sangre (Living with Diabetes: Type 2 Diabetes | ADA, s. f.). A pesar de los beneficios ampliamente documentados del automonitoreo de la glucosa en sangre (SMBG, por sus siglas en inglés) y del monitoreo continuo de glucosa (CGM, por sus siglas en inglés) para el control glucémico, la adherencia continúa siendo un desafío importante entre las personas con diabetes. Los estudios indican que la falta de adherencia al SMBG afecta aproximadamente al 46% de los pacientes, con tasas del 40% en diabetes tipo 1 (T1D) y del 47% en diabetes tipo 2 (T2D). Entre las principales barreras se encuentran la falta de conocimiento sobre el SMBG (60%), la ausencia de un glucómetro (54%), la percepción de inutilidad del monitoreo (36%), el alto costo de las tiras reactivas (80%), el dolor asociado al procedimiento (30%) y la incomodidad (40%). Otros factores predictivos de baja adherencia incluyen la corta duración de la enfermedad, el analfabetismo, la ausencia de antecedentes familiares y un nivel socioeconómico bajo.

En cuanto al uso del CGM, a pesar de ventajas como una mejor regulación de la glucosa y la reducción de eventos hipoglucémicos, los pacientes reportan dificultades relacionadas con el alto costo de los sensores, molestias por los adhesivos, preocupaciones por la visibilidad del dispositivo, dificultad para interpretar grandes volúmenes de datos y soporte tecnológico limitado. Factores psicológicos, como la preocupación por el deterioro cognitivo y físico, así como aspectos relacionados con la participación de los cuidadores, también influyen en la adherencia. Además, la mayoría de los estudios se han centrado en poblaciones étnicamente homogéneas y con mayor nivel socioeconómico, lo que resalta la necesidad de realizar más investigaciones en poblaciones diversas y desatendidas, con el fin de comprender mejor las

barreras y los facilitadores multifactoriales del automonitoreo eficaz de la glucosa (Zgibor y Simmons, 2002; Fonseca et al., 2024; Shah et al., 2024; Barchiesi et al., 2025; Analysis of factors influencing blood glucose self-monitoring behavior in patients with gestational diabetes mellitus and construction of its prediction model, s. f.). En las Tablas 1 y 2 se presentan las principales barreras y facilitadores identificados en los estudios previamente mencionados.

Tabla 1 Barreras en el automonitoreo de glucosa en sangre.

Barreras / Limitantes	**Porcentaje**	**Factores adicionales**
Falta de conocimiento sobre el automonitoreo de glucosa en sangre	60%	Educación y concienciación limitadas
Ausencia de glucómetro	54%	Acceso limitado a los dispositivos
Percepción de inutilidad del monitoreo	36%	Creencias sobre la necesidad del monitoreo
Alto costo de las tiras reactivas	80%	Factores económicos
Procedimiento doloroso	30%	Malestar físico
Incomodidad del proceso	40%	Comodidad y motivación
Historia corta de la enfermedad	55%	Experiencia limitada
Diabetes tipo 2 (DM2) frente a tipo 1 (DM1)	47.15% vs 40%	Tipo de diabetes
Analfabetismo	52.94%	Nivel educativo
Antecedentes familiares negativos	51%	Influencia familiar
Condición económica desfavorable	73.52%	Bajo nivel socioeconómico

Tabla 2 Barreras y facilitadores del monitoreo ontinuo de glucosa.

Barreras / Limitantes	**Porcentaje**	**A Factores adicionales**
Alto costo del sensor	–	Económicos
Dificultades de uso o comprensión	Difficulty interpreting data	Alfabetización tecnológica
	and operating device	
Molestia por los adhesivos o la inserción del sensor	–	Aspectos físicos / comodidad
Visibilidad del sensor	–	Preocupaciones estéticas
Falta de soporte tecnológico	–	Capacitación insuficiente
Bajo nivel de alfabetización en salud	–	Educación y comprensión
Apoyo social limitado	–	Apoyo familiar / de cuidadores
Ansiedad o preocupación por la salud	–	Factores psicológicos
Participación del cuidador	Puede actuar como facilitador o barrera, dependiendo de la formación y la experiencia.	Dinámicas sociales / de apoyo

Considerando las barreras identificadas en estudios previos sobre el monitoreo de glucosa, tales como el alto costo, la incomodidad, los desafíos tecnológicos y la baja adherencia, se evidencia una necesidad clara de desarrollar métodos alternativos y no invasivos para evaluar el estado glucémico. En este contexto, se desarrolló un enfoque novedoso basado en el uso de muestras de saliva seca y análisis óptico multicolor. El uso de la saliva para estimar los niveles de glucosa ha sido ampliamente estudiado en trabajos como los de Giaretta et al. (2024), Song et al. (2024), Chen et al. (2025) y Vaidya, Sahoo y Shende (2025).

Al irradiar la saliva seca con luz verde, azul, blanca y violeta, y medir la luz transmitida mediante un sensor BH1750, fue posible distinguir entre estados de glucosa preprandiales y posprandiales. La integración de un clasificador *K-Nearest Neighbors* (KNN) demuestra además el potencial de este método como una herramienta rápida, de bajo costo y no invasiva, capaz de superar algunas de las limitaciones del monitoreo convencional de glucosa, abriendo el camino hacia futuras aplicaciones para la clasificación de los niveles de glucosa como bajos, normales o altos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Recolección y procesamiento de muestras

Durante un periodo de cinco días, se analizaron 5 microlitros de saliva pre y pos prandial de un sujeto sano (sin diagnóstico de diabetes). Antes de la recolección, el participante enjuagó

su boca únicamente con agua simple. La saliva se obtuvo directamente de la cavidad oral utilizando una pipeta. La muestra se depositó sobre un portaobjetos de vidrio de 1 mm de espesor y se secó en una superficie metálica calentada a aproximadamente 70 °C. Una vez seca, se irradió con luz emitida por el diodo LED RGB modelo YSL-R596CR3G4B5C-C10 (YSL-R596CR3G4B5C-C10 by SparkFun Electronics Datasheet | DigiKey, s. f.). El LED fue calibrado para emitir luz verde, azul, blanca y violeta. Este se colocó a una distancia de 0.5 cm por encima de la muestra de saliva seca. Debajo del portaobjetos, a una distancia de 0.5 cm, se ubicó un sensor BH1750 GY-302 («GY-302-BH1720-Sensor-de-luz-ambiental-Datasheet.pdf», s. f.) para captar la luz transmitida a través de la muestra.

Las mediciones del sensor BH1750 se almacenaron en una tarjeta microSD usando un módulo de lectura/escritura («Microsoft Word - Escr_LeerSD.doc», s. f.) controlado por un Arduino Mega 2560 (Mega 2560 Rev3 | Arduino Documentation, s. f.)., el cual también moduló el color y la intensidad del LED mediante la función analogWrite. Esta función acepta valores entre 0 y 255 para ajustar el ciclo de trabajo del PWM: un valor alto mantiene el pin más tiempo en HIGH, incrementando la luminosidad del LED, mientras que un valor bajo reduce ese tiempo y hace que la luz sea más tenue. Aunque el pin solo alterna entre 0 V y 5 V, la conmutación rápida del PWM hace que el ojo humano perciba un brillo continuo relacionado con el ciclo de trabajo, lo que permite ajustar la intensidad sin cambiar el voltaje. En este contexto, el LED se conectó a pines PWM que operan alrededor de 490 Hz, cuyo período de ciclo se muestra en la Ecuación 1.

$$T = \frac{1}{f} \tag{1}$$

Así, T=1/490 Hz, por lo que el período de la señal es aproximadamente 0.00204 segundos o 2.04 milisegundos (ms). Dado que el valor máximo que puede asignarse a la función analogWrite es 255, el ciclo de trabajo (duty cycle), considerando por ejemplo un valor de 10, puede calcularse mediante la Ecuación 2.

$$Duty\ cycle\ (\%) = \frac{Value}{255} x100 \tag{2}$$

Así, un valor de 10 corresponderá a un ciclo de trabajo de 0.0392 o 3.92 %. Con ello, es posible estimar el tiempo durante el cual el LED permanecerá encendido utilizando la Ecuación 3.

$$ON\ time = Duty\ cycle \times T \tag{3}$$

Al multiplicar 0.0392 × 2.04 ms, se obtiene que el LED permanecerá encendido aproximadamente 0.08 ms. Con analogWrite(10) en un pin de 490 Hz, el pin estará ENCENDIDO durante aproximadamente 80 microsegundos y APAGADO durante unos 1960 microsegundos en cada ciclo.

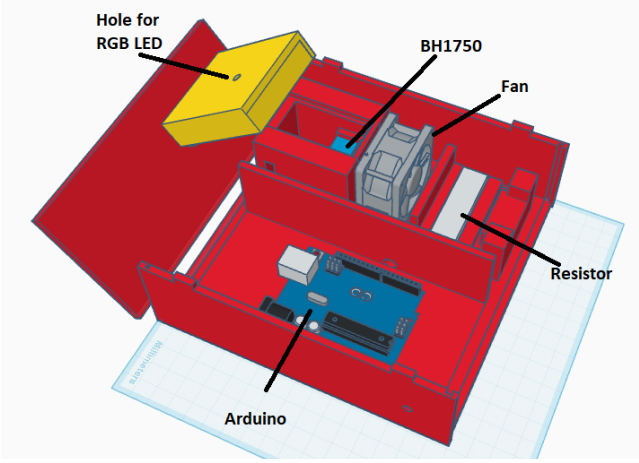


Figura 1 Arreglo interno de los componentes del dispositivo.

Esto da como resultado un LED con una luminosidad muy tenue, apenas visible.

2.2 Diseño del encapsulado

El encapsulado se imprimirá en PLA y contendrá el Arduino Mega 2560, responsable del control de los sensores y del procesamiento de las mediciones. Incluirá un ventilador para enfriar la resistencia tras el secado, así como una resistencia de 10 W y 4.7 Ω destinada a calentar el portaobjetos y secar la muestra de saliva. También contará con al menos dos cavidades: una para el área de secado y otra para la irradiación con el LED RGB. El ventilador podrá activarse mediante un pulsador para facilitar la refrigeración. Además, se incorporará un compartimento aislado para el LED RGB y el sensor BH1750, evitando la entrada de luz externa y permitiendo manejar el portaobjetos de manera segura. Por último, las baterías estarán ubicadas en el exterior junto con una pantalla para indicar el estado del proceso, dos pulsadores para iniciarlo y el módulo de microSD.

La distribución de la energía hacia el Arduino o hacia la resistencia se realizará mediante un interruptor de palanca MTS-103 1P3T 125 V 6 A («switch», s. f.).El diseño fue elaborado utilizando el software de acceso libre Tinkercad (Tinkercad, s. f.). La Figura 1 muestra el modelo diseñado.

2.3 Secado

Para el dispositivo, se consideraron dos baterías de ion-litio tipo 18650 de 3.7 voltios y 2200 mAh cada una. Para acelerar el proceso de secado, se decidió utilizar una resistencia bobinada de 10 W y 10 Ω como elemento de calentamiento.

Considerando que el proceso de secado y el análisis serán mutuamente excluyentes, la corriente que circula a través de la resistencia es de aproximadamente 0.74 amperios (Ecuación 4), lo que resulta en un consumo de potencia de aproximadamente 5.5 vatios (Ecuación 5).

$$I = \frac{V}{R} = \frac{7.4}{10} = 0.74\ A \tag{4}$$

$$P = V * I = 7.4 * 0.74 = 5.5W \tag{5}$$

La temperatura de una resistencia depende de su constante de disipación térmica θ (en °C/W). En las resistencias de potencia estándar, como las bobinadas o cerámicas, θ suele variar entre 10 y 50 °C/W, dependiendo, entre otros factores, de la ventilación. El aumento aproximado de temperatura se calcula mediante la Ecuación 6:

$$\Delta T = P * \theta \tag{6}$$

Si se considera un valor promedio razonable de θ=25 °C/W y una potencia disipada de P=5.5 W:

$$\Delta T = 5.5 * 25 \approx 137\ °C$$

Por lo tanto, la temperatura absoluta de la resistencia se determinaría mediante la Ecuación 7:

$$T_{resistor} = T_{Room\ temperature} + \Delta T = 25 + 137 = 162\ °C \tag{7}$$

Para que el encapsulado soporte el calor, el área donde se ubica la resistencia fue recubierta con mica aislante resistente a altas temperaturas (Placas térmicas, s. f.).

2.4 KNN

El KNN es un clasificador de aprendizaje supervisado que utiliza las observaciones que memoriza dentro de un conjunto de datos de prueba para predecir las clasificaciones de nuevas observaciones no etiquetadas (ref). El KNN realiza sus predicciones basándose en la similitud, usualmente medida mediante la distancia euclidiana, según la Ecuación 8.

$$DE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{8}$$

En el algoritmo KNN, una nueva observación sin etiqueta se clasifica según la clase predominante entre sus k vecinos más cercanos en el espacio de características. La regla de decisión puede expresarse formalmente como:

$$\hat{y} = mode\{y_i | x_i \in Nk(x)\} \tag{9}$$

Donde *Nk(x)* representa el conjunto de las k muestras con las menores distancias euclidianas al punto de prueba x_i e y_i denota las etiquetas de clase conocidas de esos vecinos. Antes de la clasificación, todas las características fueron normalizadas entre 0 y 1 para evitar sesgos por diferencia de escala. Cada muestra de saliva seca se representó mediante la intensidad luminosa media medida por el sensor BH1750 bajo irradiación de luz violeta, ya que esta longitud de onda mostró la mayor separabilidad entre clases. El conjunto de datos resultante consistió en vectores etiquetados que correspondían a las condiciones “preprandial” y “posprandial”.

El clasificador se entrenó con diez muestras etiquetadas y se probó con cinco muestras adicionales del mismo participante. El desempeño se evaluó para k = 1 y k = 3, utilizando la distancia euclidiana normalizada como métrica de similitud. Ambas configuraciones clasificaron correctamente todas las muestras de prueba, lo que confirma el potencial discriminativo de los datos ópticos para distinguir la saliva preprandial y posprandial en este estudio de prueba de concepto.

En este estudio, se empleó el algoritmo KNN para clasificar muestras de saliva seca recolectadas en condiciones preprandiales y posprandiales. La intensidad luminosa medida por el sensor BH1750 durante la irradiación con luz violeta se utilizó como característica de clasificación, ya que esta longitud de onda mostró la mayor capacidad discriminativa. Para cada muestra, se consideró el valor obtenido a una intensidad fija de analogWrite(180) con el fin de garantizar la consistencia de las mediciones. Con base en los valores promedio obtenidos durante la etapa de calibración, se aplicó el clasificador KNN con K = 1 a cinco muestras sin etiquetar, utilizando la distancia euclidiana normalizada como métrica de similitud.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Una vez que las partes del encapsulado fueron impresas y los componentes conectados. Tras habilitar el proceso de secado mediante el interruptor MTS-103 y colocar la muestra de saliva sobre el portaobjetos, esta se posicionó sobre la resistencia calefactora para favorecer el secado. Después de aproximadamente 2 minutos, es posible observar la transición de una muestra líquida a una mancha blanquecina, como se muestra en la Figura 2.

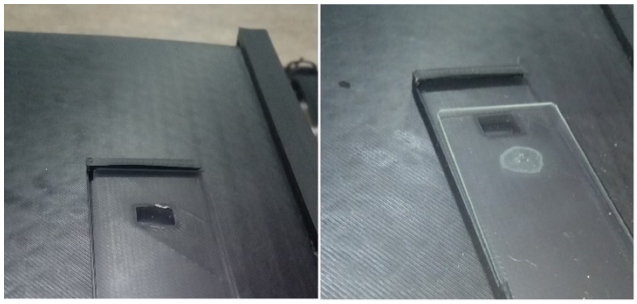


Figura 2 Muestra de saliva antes y después de secar.

La muestra seca se colocó sobre un soporte diseñado de manera que solo la luz incidente sobre la muestra pudiera atravesar el portamuestras y ser detectada por el sensor BH1750. La Figura 4 muestra la muestra irradiada con luz verde, azul, blanca y violeta.

Las muestras fueron irradiadas usando un pin PWM del Arduino, aplicando 255 niveles de intensidad para cada color. Así, un solo color produce 255 valores y, al usar cuatro colores, cada muestra genera un vector de 1020 datos. Tras irradiar con un color, los valores captados por el sensor BH1750 se almacenaron en un vector y luego se guardaron en un archivo .txt mediante el módulo de escritura, liberando memoria en el Arduino.

Cada línea del archivo contiene solo el nombre del color y el valor medido en lúmenes; por ejemplo, para el color rojo con intensidad 0 se registra: *Red 0.*

Figura 3 Radiación de saliva seca con diferentes colores.

Las mediciones de cada color fueron agrupadas y promediadas, y se calculó la desviación estándar de los registros. La Figura 5 muestra los gráficos obtenidos a partir del promedio de las mediciones para cada color, con una desviación estándar restada y sumada a la media para ilustrar la dispersión de los datos. La curva roja representa las mediciones promedio del sujeto después del desayuno, mientras que la curva gris corresponde a las mediciones del mismo sujeto antes del desayuno.

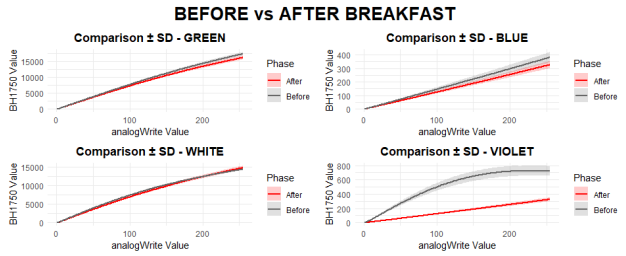


Figura 4 Resultados de la radiación de las diferentes muestra secas de saliva con diferentes colores. En color sólido el promedio tomadas antes (gris) y después (rojo) de desayunar, el área sombreada representa una desviación estándar bajo y sobre el promedio.

El comportamiento esperado es que, después de un período de ayuno de al menos 8 horas, los niveles de glucosa en sangre se encuentren regulados. Al romper el ayuno, se espera que los niveles de glucosa aumenten y alcancen su punto máximo entre 30 y 45 minutos después de finalizar la comida, tal como se ha señalado en la literatura (Bellini et al., 2024; Lejk, Myśliwiec y Jarosz-Chobot, 2024; Shibib et al., 2024; Joshi et al., 2025). Con base en esto, se espera que el dispositivo muestre una curva de menor altura para las mediciones registradas antes del desayuno, ya que la saliva contendría menor cantidad de glucosa (entre otros componentes) en comparación con los niveles posteriores a la ingesta, resultando en una saliva más turbia que reduciría la cantidad de luz transmitida desde el LED. Aunque este comportamiento puede observarse con la luz verde y azul, es con la luz violeta donde las diferencias se vuelven más pronunciadas; incluso al sumar o restar una desviación estándar, ambas poblaciones pueden distinguirse de manera confiable.

Considerando la Figura 5, se decidió utilizar únicamente la irradiación con luz violeta de la muestra para clasificar cinco muestras adicionales del mismo sujeto: dos recolectadas antes del desayuno y tres después. Dado que los resultados de la Figura 5 mostraron una separación considerable entre las clases, incluso al considerar una desviación estándar, se graficaron únicamente las mediciones correspondientes a la luz violeta, añadiendo dos desviaciones estándar. Al observar que las poblaciones continuaban siendo fácilmente distinguibles, se eligió el clasificador KNN con K = 1 para caracterizar las muestras. Los resultados se presentan en la Figura 6.

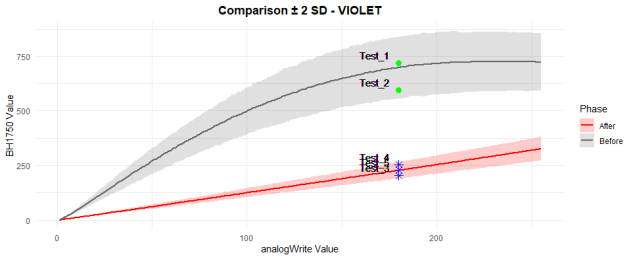


Figura 5 Resultados obtenidos de clasificar 5 pruebas adicionales 2 antes de desatunar (verde) y 3 posteriores (azul).

Se evaluó el desempeño preliminar del clasificador calculando exactitud, sensibilidad y especificidad con cinco muestras de prueba del mismo participante. El algoritmo KNN, probado con k = 1 y k = 3, obtuvo en ambos casos 100 % en todas las métricas, lo que indica una alta consistencia de las características ópticas bajo las condiciones del experimento. No obstante, al realizarse con un solo participante, estos resultados deben tomarse únicamente como una validación inicial y no como métricas clínicamente generalizables. También se señala el contexto de la diabetes, una enfermedad de alto impacto mundial que en 2021 causó 1.6 millones de muertes y que afectó en 2022 al 14 % de los adultos, muchos de ellos sin tratamiento. La adherencia al monitoreo de glucosa con métodos tradicionales, como las tiras reactivas (SMBG) o los sensores continuos (CGM), se ve limitada por diversos factores: su alto costo, el malestar físico que pueden generar, la complejidad tecnológica y barreras psicológicas y socioeconómicas. Estas dificultades reducen su eficacia en la práctica clínica.

Ante la necesidad de alternativas no invasivas y de bajo costo para estimar glucosa, se desarrolló un prototipo que analiza saliva seca mediante irradiación multicolor (verde, azul, blanca y violeta) y mediciones de transmisión de luz con un sensor BH1750. Los resultados indicaron que la saliva posprandial es más turbia y transmite menos luz, y que la luz violeta ofrece la mejor separación entre muestras pre y posprandiales. El clasificador KNN (k = 1) identificó correctamente las cinco muestras adicionales, mostrando la capacidad del sistema para diferenciar ambos estados. Aunque el estudio se limitó a un solo participante, constituye un avance inicial que permite plantear estudios piloto más amplios. En conjunto, los hallazgos sugieren que la combinación de saliva seca, análisis óptico y KNN podría convertirse en una alternativa prometedora para el monitoreo no invasivo de glucosa.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló y evaluó un prototipo capaz de diferenciar saliva preprandial y postprandial utilizando transmisión óptica

multicolor y clasificación mediante KNN. Los resultados mostraron que la luz violeta ofrece la mejor discriminación y que el dispositivo puede caracterizar de forma confiable las muestras de saliva seca. Aunque el estudio se basó en un solo participante, las mediciones obtenidas durante varios días evidenciaron consistencia intraindividual, respaldando la viabilidad del enfoque no invasivo. Sin embargo, el tamaño reducido de la muestra limita la generalización estadística. Para trabajos futuros se propone ampliar la cohorte a individuos con distintas condiciones metabólicas y comparar las mediciones ópticas con valores de glucosa de referencia, con el fin de obtener métricas clínicas más robustas. También se plantea mejorar el aislamiento óptico y la estabilidad mecánica del prototipo, avanzando hacia un dispositivo portátil, preciso y de bajo costo para estimar glucosa mediante saliva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el financiamiento otorgado para la ejecución del proyecto registrado en la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) con número 20254310.

REFERENCIAS

Analysis of factors influencing blood glucose self-monitoring behavior in patients with gestational diabetes mellitus and construction of its prediction model (sin fecha) African Journal of Reproductive Health. Disponible en: https://journals.co.za/doi/10.29063/ajrh2025/v29i6.11 (Accedido: 4 de octubre de 2025).

Barchiesi, M.A. et al. (2025) «Continuous glucose monitoring in type 2 diabetes: a systematic review of barriers and opportunities for care improvement», International Journal for Quality in Health Care, 37(3), p. mzaf046. Disponible en: https://doi.org/10.1093/intqhc/mzaf046.

Bellini, A. et al. (2024) «Exercise Prescription for Postprandial Glycemic Management», Nutrients, 16(8), p. 1170. Disponible en: https://doi.org/10.3390/nu16081170.

Chen, K. et al. (2025) «Uniformity and stability of saliva composition based on glucose concentration analysis», Clinica Chimica Acta, 573, p. 120283. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.cca.2025.120283.

Diabetes (sin fecha). Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diabetes (Accedido: 4 de octubre de 2025).

Enfermedades no transmisibles (sin fecha). Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases (Accedido: 4 de octubre de 2025).

Fonseca, L.M. et al. (2024) «Barriers and Facilitators of Self-Management in Older People with Type 1 Diabetes: A Narrative Review Focusing on Cognitive Impairment», Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy, 17, pp. 2403-2417. Disponible en: https://doi.org/10.2147/DMSO.S410363.

Giaretta, J. et al. (2024) «Glucose Sensing in Saliva», Advanced Sensor Research, 3(11), p. 2400065. Disponible en: https://doi.org/10.1002/adsr.202400065.

«GY-302-BH1720-Sensor-de-luz-ambiental-Datasheet.pdf» (sin fecha). Disponible en: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2018/09/GY-302-BH1720-Sensor-de-luz-ambiental-Datasheet.pdf (Accedido: 5 de octubre de 2025).

Joshi, S. et al. (2025) «Postprandial Glucose: A Variable in Continuum», Clinical Medicine Insights: Endocrinology and Diabetes, 18, p. 11795514251370507. Disponible en: https://doi.org/10.1177/11795514251370507.

Lejk, A., Myśliwiec, K. y Jarosz-Chobot, P. (2024) «Effects of different types of meals on postprandial glycaemia in healthy subjects», Pediatric Endocrinology Diabetes and Metabolism, 30(3), pp. 159-162. Disponible en: https://doi.org/10.5114/pedm.2024.142587.

Living with Diabetes: Type 2 Diabetes | ADA (sin fecha). Disponible en: https://diabetes.org/living-with-diabetes/type-2 (Accedido: 4 de octubre de 2025).

Mega 2560 Rev3 | Arduino Documentation (sin fecha). Disponible en: https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/ (Accedido: 5 de octubre de 2025).

«Microsoft Word - Escr_LeerSD.doc» (sin fecha). Disponible en: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2018/07/Escr_LeerSD.pdf (Accedido: 5 de octubre de 2025).

Placas termicas (sin fecha). Disponible en: https://termimex.com.mx/placas-termicas.html (Accedido: 5 de octubre de 2025).

Shah, M.A. et al. (2024) «Non-adherence to self-monitoring of blood glucose (SMBG) in poorly controlled type 1 and type 2 diabetes mellitus.», The Professional Medical Journal, 31(06), pp. 943-947. Disponible en: https://doi.org/10.29309/TPMJ/2024.31.06.8129.

Shibib, L. et al. (2024) «Manipulation of Post-Prandial Hyperglycaemia in Type 2 Diabetes: An Update for Practitioners», Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy, 17, pp. 3111-3130. Disponible en: https://doi.org/10.2147/DMSO.S458894.

Song, C. et al. (2024) «Electrochemical Glucose Sensors: Classification, Catalyst Innovation, and Sampling Mode Evolution», Biotechnology Journal, 19(10), p. e202400349. Disponible en: https://doi.org/10.1002/biot.202400349.

«switch» (sin fecha). Disponible en: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2020/11/MTS-SMTS-Series.pdf (Accedido: 5 de octubre de 2025).

Tinkercad (sin fecha) Tinkercad. Disponible en: https://www.tinkercad.com/ (Accedido: 5 de octubre de 2025).

Vaidya, A., Sahoo, J. y Shende, P. (2025) «Molecularly imprinted polymer-based biosensor for detection of salivary glucose in diabetes», International Journal of Pharmaceutics, 671, p. 125219. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.125219.

YSL-R596CR3G4B5C-C10 by SparkFun Electronics Datasheet | DigiKey (sin fecha). Disponible en: https://www.digikey.com/en/htmldatasheets/production/3544000/0/0/1/ysl-r596cr3g4b5c-c10 (Accedido: 5 de octubre de 2025).

Zgibor, J.C. y Simmons, D. (2002) «Barriers to Blood Glucose Monitoring in a Multiethnic Community», Diabetes Care, 25(10), pp. 1772-1777. Disponible en: https://doi.org/10.2337/diacare.25.10.1772.

Security System for Medical Imaging Based on Digital Steganography and Biometrics

Nuñez Ramirez, Diana * **Sánchez Díaz, Aimee Amalinalli** *
Reyes Gordillo, Jonathan Daniel *
Ruiz Gasca, Marco Antonio * **Cedillo Hernández, Manuel** **

* *Tecnológico Nacional de México campus Tláhuac, Av. Estanislao Ramírez 301, CDMX, México (e-mail: diana.nr@tlahuac.tecnm.mx, marco.ruiz@tlahuac.tecnm.mx, aimeeamalinalli@gmail.com, reyesgordillojonathandaniel@gmail.com).*
** *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional. Av. Santa Ana 1000, San Francisco Culhuacan,Coyoacan, 04430 Mexico City, Mexico. (e-mail: mcedilloh@ipn.mx)*

Abstract: The management of medical images in DICOM format faces growing security challenges that compromise diagnostic integrity and patient confidentiality. Issues such as the detachment between images and Electronic Patient Records (EPR), along with the lack of robust source authentication, create significant vulnerabilities. This paper presents the development of a comprehensive security system based on digital steganography and biometrics to mitigate these risks. The proposed system merges two watermarking techniques: a visible-imperceptible watermark in the spatial domain for source authentication, and a reversible data hiding method with contrast enhancement to embed key patient information directly into the image, thus ensuring its link to the EPR. As an additional security layer, a biometric authentication module using a fingerprint sensor is integrated to control access to the software's critical functions. The development was carried out in the MATLAB environment, culminating in a functional application with a graphical user interface. The results validate the system's effectiveness, demonstrating both high imperceptibility of the watermarks and remarkable robustness against various distortions. This work offers a complete solution for the secure management of medical imaging in clinical and telemedicine environments.

Keywords: Biometric Authentication, DICOM, Steganography, Medical Imaging, Watermarking.

1. INTRODUCCIÓN

La era digital ha transformado radicalmente el sector de la salud, donde la gestión de imágenes médicas, regida por el estándar en Imagenología Digital y Comunicaciones en Medicina (DICOM, por sus siglas en inglés) (DICOM Standard (2024)), se ha convertido en un pilar del diagnóstico moderno. Sin embargo, esta digitalización y la interconectividad de los Sistemas de Archivo y Comunicación de Imágenes (PACS, por sus siglas en inglés) (Strickland (2000)) han propiciado la exposición de información delicada a vulnerabilidades digitales críticas que pueden perjudicar a las instituciones. El sector salud es uno de los objetivos más atacados a nivel mundial; solo en México, se registraron miles de millones de intentos de ciberataques en los últimos años, con un aumento significativo de ransomware dirigido a hospitales. Amenazas como el secuestro de dispositivos médicos (MEDJACK) y la manipulación de imágenes mediante inteligencia artificial han sido demostradas, evidenciando la urgencia de soluciones de seguridad robustas (TrapX Security (2018), Mirsky et al. (2019), HIPAA Journal (2018)).

Más allá de los ataques externos, existen riesgos administrativos internos exacerbados por la digitalización. En México, problemas como la homonimia —la existencia de múltiples personas con nombres idénticos— pueden provocar errores catastróficos en la asociación de datos, llevando a la desvinculación entre una imagen y su Expediente Clínico Electrónico (ECE) correcto (CONDUSEF (2022)). Esto, sumado a la falta de una autenticación de origen fiable, crea un entorno de alto riesgo para la seguridad del paciente.

Estudios previos han explorado marcas de agua para la protección de imágenes médicas (Nuñez Ramirez (2019)). Para abordar esta problemática de manera integral, este trabajo presenta un sistema que combina esteganografía con autenticación biométrica. Se utiliza un enfoque de marca de agua que fusiona dos técnicas: una Marca de Agua Visible-Imperceptible (VIW, por sus siglas en inglés), esta marca de agua es una técnica que recopila las ventajas de una marca de agua imperceptible y una visible ya que emula el comportamiento de las marcas de

agua análogas empleadas en billetes en México, el objetivo de la VIW es la autenticación visual rápida. Por otro lado, la técnica de esteganografía de Ocultamiento de Datos Reversible con Mejora de Contraste (RDH-CE) se enfoca en insertar información significativa del expediente del paciente de forma segura y sin pérdidas, como se explora en (Nuñez-Ramirez et al. (2024)). Adicionalmente, se integra un sensor de huella dactilar para controlar el acceso al sistema y a la información de forma oportuna y segura, esto será posible gracias a la gestión de credenciales de cada una de las entidades involucradas de acuerdo con el estándar DICOM (DICOM Standard (2024)).

Este enfoque integral no solo responde a las amenazas de manipulación directa, sino que también se alinea con los marcos normativos de ciberseguridad en salud, como los propuestos por el NIST, que exigen la implementación de controles técnicos para garantizar la integridad y autenticidad de la información del paciente (National Institute of Standards and Technology (2008)).

2. METODOLOGÍA

La Fig. 1 presenta un diagrama de bloques que ilustra la arquitectura general y la interacción entre los tres módulos principales que componen la solución de seguridad.

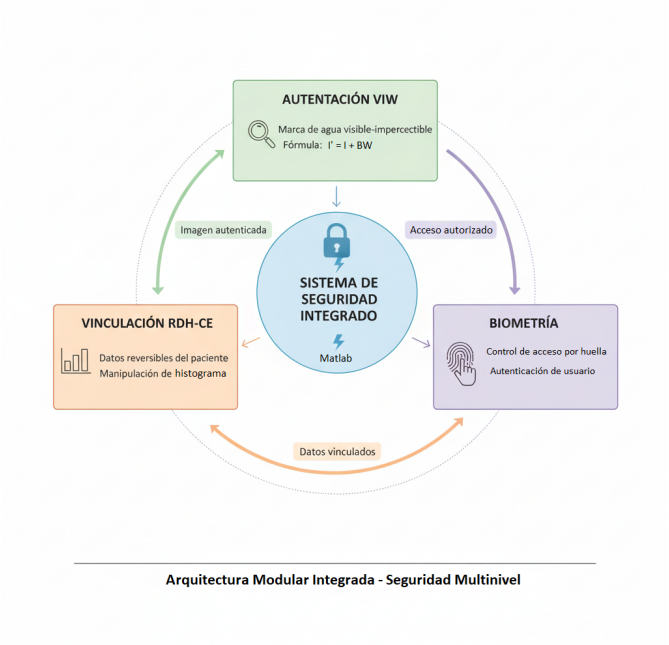


Figura 1. Visión general del sistema integrado.

El sistema fue concebido como una aplicación modular, integrando una interfaz de hardware para la autenticación biométrica por parte del personal médico. La metodología se centró en el desarrollo de componentes que operan de forma sinérgica, todas las imagenes son procesadas al ser marcadas con la técnica VIW y procesadas por RDH-CE. La siguiente etapa es la de accesibilidad en donde el primer paso consiste en cargar la imagen DICOM, el siguiente paso es la autenticación del usuario a partir de su huella dactilar, cuando se identifica al usuario se decide que información es revelada, es decir, solo la verificación de origen de la imagen o bien información detallada del expediente insertada en la Región de Interes de la imagen (ROI, por sus siglas en inglés). Por lo tanto los ultimos dos pasos pueden variar para garantizar la seguridad del sistema, como se muestra en la Fig. 2.

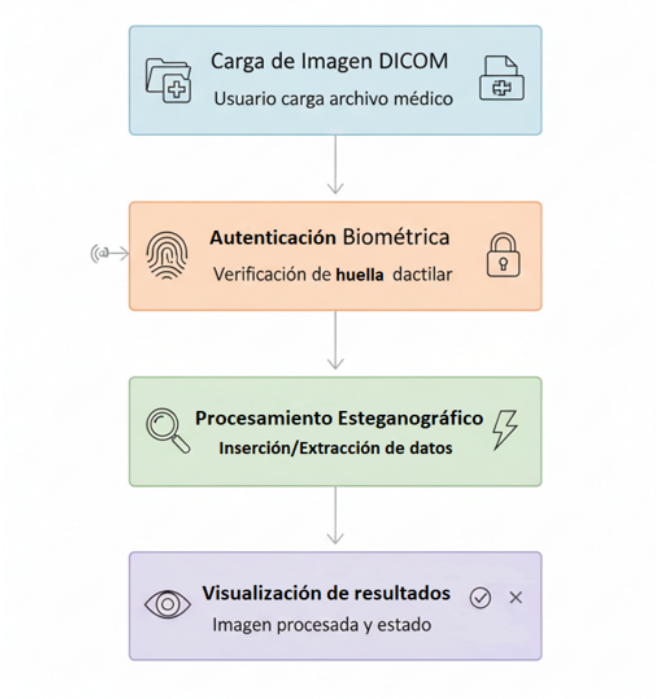


Figura 2. Flujo de operación del sistema desde la perspectiva del usuario.

2.1 Módulo de Autenticación (VIW)

Este módulo, responsable de la autenticación de origen, inserta un logotipo de forma visible-imperceptible. El proceso se automatizó en MATLAB para asegurar la consistencia y la mínima afectación a la imagen. Primero, se realiza una segmentación para aislar la Región de No Interés (RONI, por sus siglas en inglés). Se aplica el umbral de Otsu para obtener una máscara binaria que separa el fondo obscuro o RONI del área diagnóstica o ROI. Sobre esta máscara, el algoritmo de Agrupamiento Iterativo Lineal Simple (SLIC, por sus siglas en inglés) agrupa los píxeles del fondo en "superpíxeles", para lograr identificar regiones con textura homogénea y pixeles de bajo valor.

Posteriormente, la fuerza de inserción (β) se calcula basándose en un análisis adaptativo de la región candidata. Se evalúan dos parámetros clave: la **entropía**, que cuantifica la homogeneidad de las regiones delimitadas por los superpíxeles, y la **intensidad promedio** de los pixeles al evaluar el histograma. Las regiones con baja entropía (más homogéneas) y baja intensidad (más oscuras) son ideales, ya que pueden tolerar una modificación significativa sin generar distorsiones visibles que afecten la valoración del diagnóstico médico. La fuerza β se calcula de forma dinámica para cada región, asegurando un equilibrio óptimo entre imperceptibilidad y futura visibilidad. Finalmente, el logotipo binario se inserta mediante la Ec. (1), que describe un proceso aditivo.

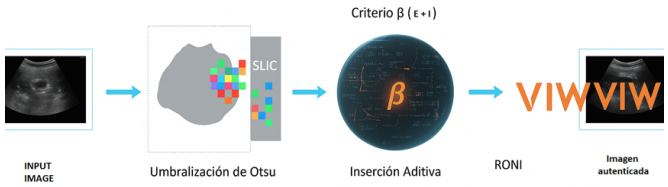


Figura 3. Proceso algorítmico del módulo de autenticación VIW.

$$I' = I + \beta \cdot W \tag{1}$$

donde I' es la imagen marcada, I es la imagen original, W es la marca de agua binaria y β es la fuerza de inserción.

2.2 Módulo de Vinculación de Datos (RDH-CE)

Para vincular de forma irrefutable los datos del paciente con la imagen, se desarrolló este módulo de ocultamiento 100 % reversible. El proceso inicia con la preparación de los datos: se extraen identificadores clave de los metadatos DICOM y se procesan con la función de resumen hash criptográfico RIPEMD-160 para generar una firma digital de tamaño fijo, es decir, una cadena binaria de 160 bits. Esta firma actúa como la marca de agua a insertar.

El núcleo del módulo es el algoritmo RDH-CE, inspirado en los trabajos de (Gao and Wan (2017)) y (Zhiqiang et al. (2021)), que modifica el histograma de la región donde se aplicó la VIW y en la ROI para proteger la imagen de ataques. El algoritmo primero escanea el histograma de la región para identificar los picos (bins con mayor frecuencia) y los valles (bins con cero frecuencia). Mediante un proceso de desplazamiento de histograma, los valores de los píxeles se mueven para expandir un valle existente o crear uno nuevo. Los bits de la firma digital se insertan en este espacio. De forma crucial, se almacena información auxiliar (bookkeeping) que permite revertir el proceso con total fidelidad. Como un efecto sinérgico, este desplazamiento expande el rango dinámico local, mejorando el contraste y revelando la marca VIW del módulo anterior.

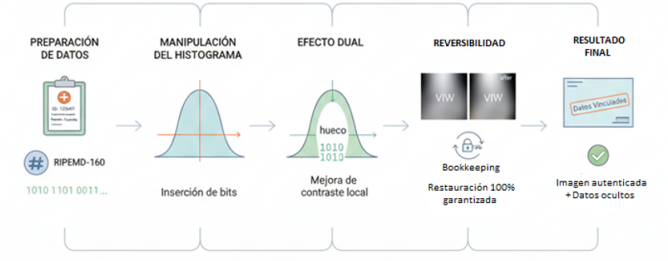


Figura 4. Proceso de manipulación del histograma para RDH-CE.

2.3 Integración Biométrica

Esta es la capa de seguridad mecatrónica que controla el acceso. Se integró un sensor de huella dactilar capacitivo mediante su puerto USB, estableciendo la comunicación con MATLAB a través del objeto 'serialport'. Se desarrolló un script de control que encapsula el protocolo de comunicación del sensor, enviando comandos de inicialización y captura, y recibiendo el mapa de píxeles de la huella. Cuando una función crítica es invocada, este script se activa.

Se implementó un algoritmo de extracción de minucias basado en la binarización de la imagen, el adelgazamiento de las crestas y la detección de terminaciones y bifurcaciones. La plantilla de minucias generada en tiempo real se compara con la almacenada de forma segura. Un algoritmo de matching, basado en la correlación de patrones, determina el grado de coincidencia. Si este supera un umbral de seguridad, el script devuelve una bandera de éxito; de lo contrario, deniega el acceso, protegiendo las operaciones de inserción, extracción y de revelado de la imagen original.

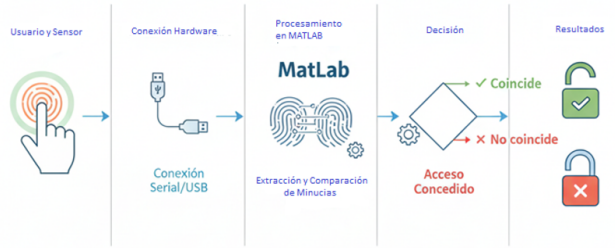


Figura 5. Flujo del proceso de autenticación biométrica.

2.4 Diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

Para asegurar la usabilidad del sistema por personal clínico, se desarrolló una GUI intuitiva utilizando App Designer de MATLAB. El diseño se centró en un flujo de trabajo lógico y una retroalimentación clara. La interfaz se estructura en tres paneles principales: un área de visualización que permite cargar y comparar la imagen original y la procesada; un panel de información que extrae y muestra automáticamente los metadatos más relevantes del paciente desde el archivo DICOM; y un panel de control con botones de acción inequívocos para "Proteger imagen", "Seleccionar imagenz "Guardar imagen protegida". Un área de estado de texto informa al usuario en tiempo real sobre el progreso, como .Esperando autenticación biométrica....º "Proceso completado con éxito", guiando al usuario a través del flujo de trabajo de manera intuitiva y minimizando la posibilidad de errores operativos.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El rendimiento del sistema se validó rigurosamente en un entorno de pruebas en un ambiente controlado. Se utilizó un conjunto de 20 imágenes en formato DICOM, con dimensiones de 512x512 píxeles.

Análisis Comparativo con Trabajos Similares. Para contextualizar la aportación de este trabajo, es relevante compararlo con sistemas recientes que abordan problemas similares. Por ejemplo, el trabajo de Qasim et al. (2019) propone un esquema de marca de agua reversible (RDH) basado en Expansión de Diferencia (DE) para imágenes de Resonancia Magnética. Si bien su enfoque es robusto para

la integridad y logra alta imperceptibilidad (PSNR » 92 dB), se centra únicamente en la inserción en la ROI y no incluye la autenticación de origen (VIW) ni una capa de acceso biométrico.

Por otro lado, Zhiqiang et al. (2021) (cuyo trabajo inspira nuestro módulo RDH-CE) se enfoca en la mejora de contraste automática simultánea al ocultamiento de datos. Su método también separa ROI y RONI, pero su objetivo principal es la mejora visual y la capacidad de datos, sin contemplar la autenticación de origen (VIW) ni el control de acceso.

La contribución principal de nuestro sistema radica en la **integración sinérgica** de estas tres capas: la autenticación de origen (VIW), el ocultamiento reversible de datos (RDH-CE) y el control de acceso biométrico, ofreciendo una solución de seguridad más holística.

Imperceptibilidad. La calidad de las imágenes marcadas se evaluó con PSNR y SSIM. Los resultados, resumidos en la Tabla 1, confirman que la calidad diagnóstica se preserva. El PSNR promedio del sistema completo fue de 41.19 dB, superando el umbral de 40 dB considerado excelente. El SSIM promedio de 0.9382 indica una altísima similitud estructural con la imagen original.

Cuadro 1. Resultados promedio de imperceptibilidad.

Método Aplicado	PSNR (dB)	SSIM
VIW	59.45	0.9986
VIW y RDH	30.19	0.682

Robustez. La robustez se aplicó específicamente a la VIW en donde se aplicaron ataques geométricos, ruido y compresión. Como muestra la Tabla 2, el sistema resistió eficazmente la mayoría de los ataques. El único ataque que superó el umbral fue el filtro de mediana, una limitación conocida para este tipo de algoritmos.

Cuadro 2. Valores de BER promedio frente a distintas distorsiones.

Tipo de Ataque	Legilibilidad del logo
Sin Ataque	Excelente
Compresión JPEG (Q=75)	Moderada
Ruido Gaussiano ($\sigma^2 = 0{,}01$)	Buena
Rotación 45°	Buena
Filtro de Mediana (3x3)	Baja

Desempeño Computacional. Para evaluar la viabilidad del sistema en un entorno clínico, se midieron los tiempos de procesamiento de cada módulo principal en el entorno de pruebas (MATLAB R2017b, Intel Core i7, 8 GB RAM). La Tabla 3 muestra los tiempos promedio para una imagen DICOM de 512x512.

Cuadro 3. Tiempos de procesamiento promedio del sistema.

Módulo / Proceso	Tiempo (segundos)
Carga de imagen DICOM	0.35 s
Segmentación (Otsu + SLIC) y análisis RONI	1.42 s
Inserción de Marca VIW (cálculo β)	0.28 s
Inserción de datos RDH-CE (incl. Hash)	0.75 s
Verificación Biométrica (hardware)	0.53 s
Tiempo Total (Inserción)	**2.80 s**
Tiempo Total (Extracción)	**˜2.15 s**

Los resultados muestran un tiempo total de procesamiento inferior a 3 segundos para la protección completa de una imagen. Si bien estos tiempos son aceptables para un prototipo en MATLAB, se identifica un área de oportunidad para la optimización y migración a plataformas de mayor rendimiento.

Capacidad de inserción. Se estableció un umbral de Tasa de Error de Bits (BER) de 0.2 (20 %) para considerar una extracción exitosa. La reversibilidad de la técnica RDH-CE logra un BER de 0, sin embargo, es fragil ante ataques como los mencionados en la sección anterior.

Funcionalidad de la implementación completa. Las pruebas funcionales de la GUI y el módulo biométrico fueron 100 % exitosas. La Fig. 6 muestra la imagen DICOM sin ningún procesamiento.

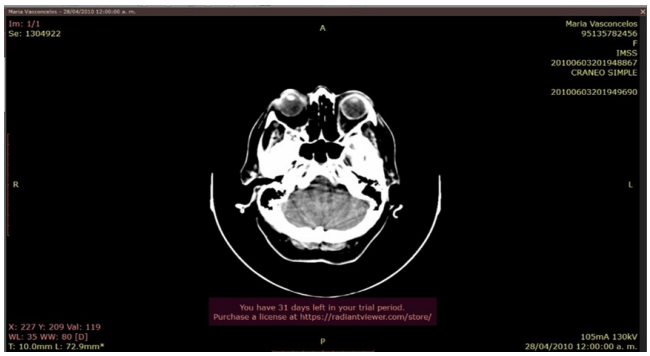


Figura 6. Imagen DICOM original

La Fig. 6 y la Fig. 7 visualmente se ven iguales, ya que la marca de agua solo es revelada bajo condiciones especificas de contraste.

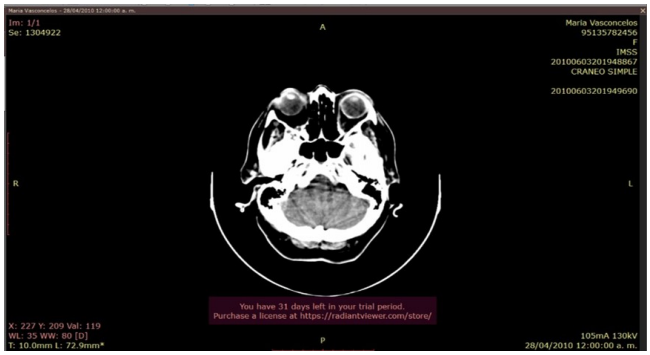


Figura 7. Imagen DICOM procesada con la marca de agua visible-imperceptible

La Fig. 8 muestra como se revela la marca de agua y se protege la ROI con los datos significativos del expediente del paciente.

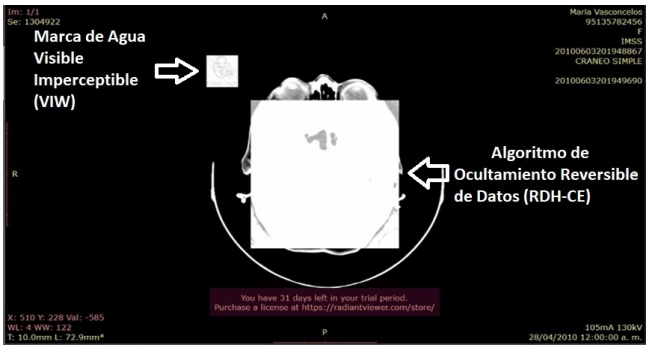


Figura 8. Imagen DICOM antes del procesamiento

4. CONCLUSIONES

Se ha diseñado, desarrollado y validado con éxito un sistema de seguridad para imágenes médicas DICOM que integra eficazmente esteganografía y biometría. La fusión de una marca de agua visible-imperceptible con una técnica de ocultamiento reversible ha demostrado ser una solución robusta para garantizar tanto la autenticación de origen como la vinculación de datos, sin comprometer la calidad diagnóstica. La incorporación de la autenticación por huella dactilar añade una capa de seguridad de acceso fundamental. El sistema desarrollado en MATLAB representa una solución completa y viable para mejorar la seguridad en la gestión de imágenes médicas.

Como trabajo futuro, se identifican dos líneas principales de mejora. La primera es la optimización del desempeño computacional, migrando los algoritmos de MATLAB a un entorno como Python o C++ para reducir los tiempos de procesamiento. La segunda, y más innovadora, es la integración de Inteligencia Artificial mediante una red neuronal de segmentación (tipo U-Net). Esto permitiría al sistema .[en]tender"la anatomía de la imagen (CT o MR) y generar máscaras de segmentación de la RONI de forma automática y precisa, eliminando la dependencia de métodos clásicos de umbralización y garantizando que la inserción de datos nunca interfiera con zonas de interés diagnóstico crítico.

REFERENCIAS

CONDUSEF (2022). Cuidado con la homonimia. `https://revista.condusef.gob.mx/wp-content/uploads/2022/09/homoni_270.pdf`. Consultado el 11 de mayo de 2024.

DICOM Standard (2024). The dicom standard. `https://www.dicomstandard.org/`. Consultado el 11 de mayo de 2024.

Gao, G. and Wan, X. (2017). Reversible data hiding with contrast enhancement and tamper localization for medical images. *Information Sciences*, 385-386, 250–265.

HIPAA Journal (2018). Beware of medical device hijack attacks – medjack 3 discovered. `https://www.hipaajournal.com/beware-medical-device-hijack-attacks-medjack-3-discovered-8697/`. Consultado el 11 de mayo de 2024.

Mirsky, Y., Mahler, T., Shelef, I., and Elovici, Y. (2019). CT-GAN: Malicious Tampering of 3D Medical Imagery using Deep Learning. In *USENIX Security Symposium*.

National Institute of Standards and Technology (2008). An introductory resource guide for implementing the health insurance portability and accountability act (hipaa) security rule. `https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-66/rev-1/final`.

Nuñez Ramirez, D. (2019). Mejora en la administración de ultrasonidos médicos usando marca de agua digital. Tesis de Maestría.

Nuñez-Ramirez, D., Fragoso-Navarro, E., Mata-Mendoza, D., and Cedillo-Hernandez, M. (2024). Secure management of dicom images via reversible data hiding, contrast enhancement and visible-imperceptible watermarking. *Health and Technology*, 14, 581–596. doi: 10.1007/s12553-024-00856-5.

Qasim, A.F., Aspin, R., Meziane, F., and Hogg, P. (2019). ROI-based reversible watermarking scheme for ensuring the integrity and authenticity of DICOM MR images. *Multimedia Tools and Applications*, 78(12), 16433–16463. doi:10.1007/s11042-018-7029-7.

Strickland, N.H. (2000). PACS (Picture Archiving and Communication Systems): filmless radiology. *Archives of Disease in Childhood*, 83(1), 82–86. doi:10.1136/adc.83.1.82.

TrapX Security (2018). MEDJACK.4: Medical Device Hijacking. Consultado el 11 de mayo de 2024.

Zhiqiang, G., Tong, S., Xia, Z., Wu, B., Xu, L., and Zhao, G. (2021). Reversible data hiding with automatic contrast enhancement for medical images. *Signal Processing*, 178, 107817. doi:10.1016/j.sigpro.2020.107817.

Software Development for External Breast Prostheses

Pérez Frías, Mario Adán *, Gutiérrez Carrillo, Rubén Alejandro * , De la O Rodríguez, Pedro* , Rodríguez-Juárez, Pedro*, Moreno Chávez, Gamaliel *, Burnes Rudecino, Susana *

** Universidad Autónoma de Zacatecas, 98160.*
(e-mail: pmarioadan@gmail.com, rubenalejandro.gutierrez.92@gmail.com, pedro.de.la.o.rodriguez@gmail.com, pedrordz@uaz.edu.mx, gamalielmch@uaz.edu.mx, susana.burnes@uaz.edu.mx)

Abstract: The physical and psychological recovery of post-mastectomy patients is a significant healthcare challenge. While breast prostheses offer a non-invasive solution to restore body symmetry, commercially available options often lack a personalized fit, leading to discomfort and dissatisfaction. This research introduces "Pink Stripes," a novel and accessible 3D reconstruction system developed to create custom-fit breast prostheses at a low cost. The primary objective is to empower the creation of highly accurate, patient-specific models by minimizing the need for expensive, specialized hardware. Our methodology is based on optical profilometry, a robust technique for 3D surface acquisition. The system utilizes only a standard digital camera and a projector, making it highly replicable in diverse clinical or domestic environments. A sequence of light patterns is projected onto the patient's thoracic region, and the deformations of these patterns are captured by the camera. Custom-developed software then processes these images to compute a phase map, which is subsequently converted into a high-fidelity mesh model of the patient's anatomy. Currently, the system is a functional prototype that has successfully generated multiple surface reconstructions. Some of these digital models have been materialized using 3D printing technology. Preliminary results are highly promising; one of the initial 3D-printed prostheses has demonstrated a high similarity in both shape and volume when compared to the original anatomy. This precision underscores the system's potential to provide a viable and affordable alternative for personalized post-mastectomy care. Future work will focus on refining the calibration process, optimizing the reconstruction algorithms for enhanced accuracy, and conducting broader clinical validation.

Keywords: Breast cancer, 3D Reconstruction, Optical Profilometry, Software, Custom Prosthetics

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento para el cáncer de mama puede incluir quimioterapias, radioterapias, hormonoterapia y/o mastectomía. Esta última consiste en la extirpación del tejido mamario afectado, lo que altera de forma significativa la apariencia física y la autoimagen de la paciente. Dicho cambio puede generar efectos psicológicos profundos, como ansiedad y depresión, por representar uno de los principales símbolos de feminidad y maternidad [1].

Tras el impacto emocional de la mastectomía, muchas mujeres optan por utilizar una prótesis mamaria externa [2], ya que pocas recurren a la cirugía de reconstrucción debido al alto costo de esta intervención quirúrgica [3]. Así, la elección adecuada de la prótesis es esencial para lograr una adaptación cómoda y funcional al nuevo cuerpo. Diversos estudios demuestran que el uso prolongado de prótesis externas incrementa la satisfacción emocional y la calidad de vida de las sobrevivientes de cáncer de mama sin reconstrucción, reduciendo el estrés asociado con la mastectomía [4].

En los últimos años se ha observado un notable avance en el diseño y fabricación de prótesis mamarias, con una amplia gama de opciones en el mercado que buscan responder a las necesidades específicas de cada usuaria. Sin embargo, a pesar de estos progresos, el costo de una prótesis de silicón continúa siendo inaccesible para muchas mujeres [5]. En el estado de Zacatecas, México, una gran parte de las mujeres acceden a prótesis mediante campañas de donación; donde dichas prótesis suelen tener tamaño, forma y peso estandarizados, lo que puede afectar la movilidad y la naturalidad en su uso [6].

Ante esta situación, se propone el desarrollo de un software orientado al diseño y fabricación de prótesis mamarias a diseño, basado en la perfilometría mediante la proyección de franjas como una alternativa eficaz para obtener el perfil mamario, sin necesidad de contacto [7]. Con el propósito de ofrecer a las sobrevivientes una alternativa accesible, cómoda y adaptada a sus características individuales, haciendo que el proceso de readaptación sea más humano y menos traumático.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se estructuró en tres fases principales: diseño, implementación y validación. Cada fase se llevó a cabo siguiendo un enfoque sistemático y progresivo, en el cual los resultados parciales de una etapa constituyeron los insumos fundamentales para la siguiente. Esta metodología permitió mantener un control riguroso

sobre la exactitud de las mediciones, la estabilidad del sistema y la funcionalidad del software, garantizando la coherencia entre los objetivos teóricos y los resultados experimentales obtenidos.

2.1 Perfilometría óptica y arreglo experimental

Durante la fase de diseño se estableció el modelo matemático basado en la técnica de perfilometría óptica por proyección de franjas, un método de medición tridimensional sin contacto que emplea la deformación de patrones de luz para reconstruir la topografía de una superficie. Esta técnica se seleccionó por su alta precisión, rapidez de adquisición y compatibilidad con materiales de diversa reflectancia, características esenciales para el modelado anatómico requerido en la creación de prótesis personalizadas.

El método aplicado corresponde al enfoque espacial de cuatro pasos, el cual se basa en la proyección secuencial de un conjunto de franjas sinusoidales con diferentes desplazamientos de fase. A partir de las imágenes capturadas, se realiza el cálculo de la fase envolvente y posteriormente su desenrollado, obteniendo así un mapa de fase continuo proporcional a la altura o relieve del objeto medido. Este mapa es transformado en un modelo tridimensional que representa fielmente la geometría de la superficie.

Para la adquisición de datos, se diseñó un arreglo experimental compuesto por un proyector digital y una cámara industrial FLIR, configurados con un ángulo fijo de triangulación que maximiza la resolución espacial. Se llevaron a cabo pruebas de calibración geométrica para asegurar la correspondencia entre los sistemas de coordenadas de ambos dispositivos, minimizando errores de paralaje y distorsión.

Los parámetros ópticos se ajustaron mediante experimentación con objetos patrón y posteriormente con modelos de prueba elaborados en unicel, lo que permitió evaluar la respuesta del sistema ante diferentes niveles de rugosidad y curvatura superficial. Esta etapa fue esencial para optimizar la sensibilidad y estabilidad del sistema antes de la implementación del software de reconstrucción y visualización.

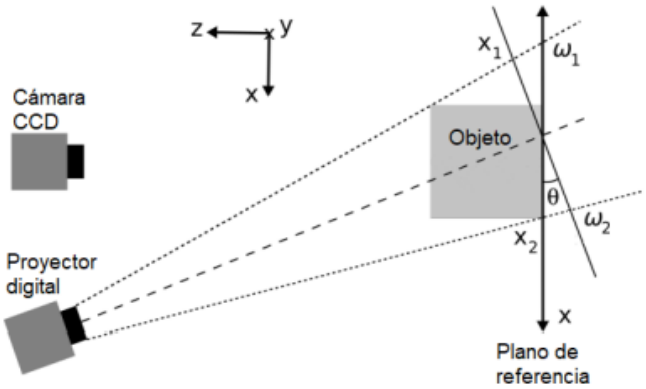


Fig. 1. Arreglo experimental utilizado.

La ecuación que describe la generación de las franjas se expresa como:

$$I(t) = I_0 + I_1 \cos cos\,(2\pi f_0 t + \emptyset)\,. \quad (1)$$

Donde I_0 representa la iluminación del fondo, I_1 la amplitud de modulación de las franjas, y $\emptyset$ el desplazamiento de fase.

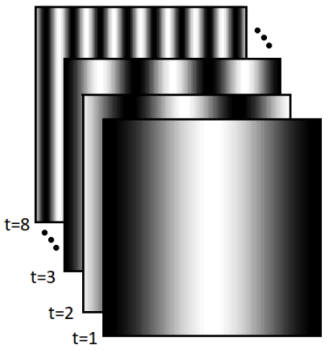


Fig. 2. Generación de franjas mediante la Ec 1.

El cálculo de la fase envuelta (φ) se realizó mediante la ecuación:

$$\varphi = arctan\left(\frac{(I_{4D}-I_{2D})(I_{1R}-1_{3R})-(I_{4R}-I_{2R})(I_{1D}-I_{3D})}{(I_{1D}-I_{3D})(I_{1R}-1_{3R})+(I_{4D}-I_{2D})(I_{14R}-I_{2R})}\right) \quad (2)$$

Posteriormente, el desenvolvimiento de fase se efectuó mediante la resolución de la ecuación de Poisson, utilizando el método propuesto por Ghiglia y Romero [8]:

$$\nabla^2\varphi = \rho, \qquad \rho \in R^{(NxM)} \quad (3)$$

$$DCT\left(\nabla^2\varphi\right) = DCT(\rho) \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{\dot{DCT}(\rho)}{2(cos cos\,\frac{\pi I}{M}+cos cos\,\frac{\pi J}{N}-2)}, \quad (5)$$

$$I_{j,i} = j,\ J_{j,i} = i,\ j = \ldots, N-1,\ i = \ldots, M-1$$

$$\psi = \dot{IDCT}(\varphi). \quad (6)$$

Ecuación para convertir fase desenvuelta a profundidad:

$$z(x,y) = \frac{LT\Delta\phi(x,y)}{T\Delta\phi(x,y)-2\pi d}\,. \quad (7)$$

Las ecuaciones presentadas (Ec. 2 a Ec. 6) describen el flujo completo para la obtención de la fase tridimensional de la

superficie. Primero, la Ec. 2 permite calcular la fase envuelta (φ) a partir de las intensidades de las imágenes capturadas en los distintos pasos del método. Posteriormente, la Ec. 3 (ecuación de Poisson) asegura que la fase se pueda desarrollar de manera continua, eliminando las discontinuidades introducidas por el cálculo envuelto. La aplicación de la Transformada Discreta del Coseno (DCT, Ec. 4) y su manipulación espectral (Ec. 5) permiten resolver numéricamente esta ecuación, y finalmente la Transformada discreta de coseno (Ec. 6) produce la fase desenrollada (ψ), lista para su conversión a coordenadas de profundidad.

Esta conversión se realiza mediante la Ec. 7, que transforma la fase desenrollada en la profundidad absoluta $z(x.y)$ de cada punto de la superficie.

2.2 Desarrollo del software

El software de control y procesamiento fue desarrollado en Python 3.10.11, aprovechando el framework Qt 6 (a través de la biblioteca PySide6) para la construcción de una interfaz gráfica de usuario (GUI) moderna e intuitiva. La arquitectura del sistema se diseñó de manera modular, separando las responsabilidades en cuatro capas principales: núcleo (/core), aplicación (/app), componentes (/components) y la interfaz de usuario (/gui), con el fin de maximizar la mantenibilidad, escalabilidad y cohesión del código.

La programación se fundamentó en los paradigmas de Programación Orientada a Objetos (POO) y Programación Orientada a Eventos (POE), este último gestionado eficientemente por el mecanismo de señales y slots de Qt. Se aplicaron principios de diseño SOLID y patrones de diseño de software reconocidos para asegurar una estructura robusta:

Singleton: Para garantizar una única instancia de servicios globales como el HardwareManager, que gestiona la comunicación con la cámara, y el NavigationService, que controla el flujo entre las distintas ventanas de la aplicación. Esto asegura un punto de acceso único y coherente a recursos compartidos.

Factory (WidgetFactory): Para desacoplar la creación de componentes de interfaz personalizados. Los archivos .ui generados con Qt Designer contienen widgets básicos (placeholders). En tiempo de ejecución, la WidgetFactory los reemplaza por componentes complejos (p. ej., botones con efectos de contorno y hover, o franjas decorativas animadas), permitiendo que el diseño visual permanezca simple mientras la implementación del código provee la riqueza funcional y estética.

Mediator (NavigationService): El NavigationService actúa como un mediador central que gestiona todas las transiciones entre ventanas. Las ventanas no se comunican directamente entre sí; en su lugar, delegan la acción de navegar al servicio. Por ejemplo, MainWindow solicita navegar a la pantalla de capturas (navigate_to('captures', ...)). El NavigationService se encarga de localizar la ventana de destino, notificarle que se prepare para la entrada y orquestar la transición, reduciendo así el acoplamiento entre los módulos de la capa app.

Observer: Implementado implícitamente a través del sistema de señales y slots de Qt, permitiendo que los componentes de la GUI reaccionen a eventos del núcleo (e.g., la llegada de un nuevo fotograma de la cámara desde un QThread en el HardwareManager) sin un acoplamiento directo.

Una característica clave de la arquitectura es la separación estricta entre la lógica de negocio y la presentación. El directorio core encapsula la funcionalidad central: el HardwareManager abstrae las complejidades del SDK de la cámara (PySpin) y ejecuta la adquisición de imágenes en un hilo de ejecución (QThread) separado para no bloquear la interfaz de usuario. Por otro lado, el módulo reconstruction_methods contiene la implementación matemática del algoritmo de reconstrucción, incluyendo el cálculo de fase envuelta y el desenvolvimiento de fase mediante un solucionador de Poisson basado en la Transformada de Coseno Discreta (DCT).

La capa app contiene las clases que controlan las ventanas principales, cada una con responsabilidades bien definidas:

MainWindow: Actúa como el menú principal y punto de entrada visual. Su lógica se centra en orquestar la navegación inicial. Al hacer clic en "Iniciar", invoca al HardwareManager para verificar la presencia de la cámara y, según el resultado, instruye al NavigationService para navegar a StartScanningWindow en caso de que sí haya una cámara conectada, o hacia NoCameraCheckWindow en caso contrario.

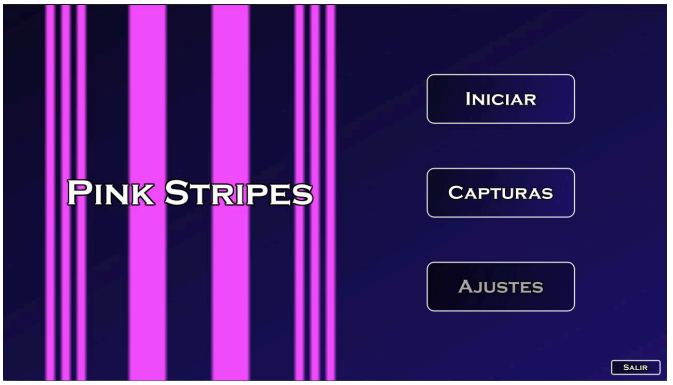


Fig. 3. Pantalla principal (MainWindow)

NoCameraCheckWindow: En esta pantalla solo se presenta un texto advirtiendo que no se encontró ningúna cámara conectada y si desea continuar sin ella, para lo cuál hay dos botones: el botón “Sí” para aceptar y continuar sin cámara hacia la pantalla StartWithoutCameraWindow, y el botón “No” para volver a la pantalla principal MainWindow.

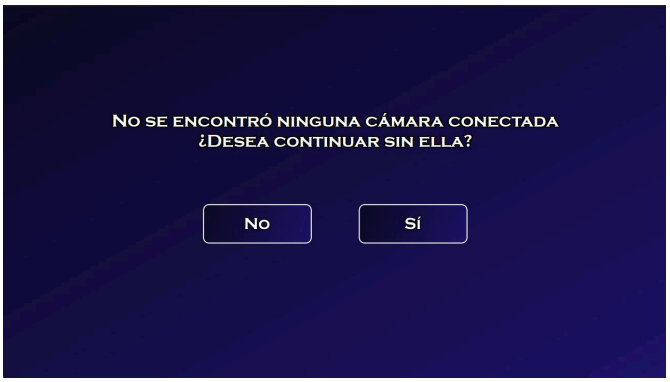


Fig. 4. NoCameraCheckWindow

StartWithoutCameraWindow: Nos sirve para realizar reconstrucciones con imágenes ya guardadas. La pantalla nos muestra dos frames para colocar imágenes, uno para colocar las imágenes de referencia y otro para las imágenes con las franjas deformadas por el objeto. La lógica de la ventana se encarga de contabilizar el número de imágenes en cada frame y al detectar el mismo número en ambos se activará el botón "Reconstruir", al presionarlo nos mostrará un widget para seleccionar un área de interés en la imágen, al hacerlo nos mandará a la ventana ShowReconstructionWindow.

Fig. 5. Ventana StartWithoutCameraWindow

ShowReconstructionWindow: Se especializa en la visualización interactiva del modelo 3D generado a partir de las imágenes, permitiendo al usuario rotar, hacer zoom y analizar la superficie reconstruida en detalle.

Fig. 6. Ventana ShowReconstructionWindow

StartScanningWindow: Gestiona todo el proceso de escaneo 3D. Se comunica intensamente con el HardwareManager para capturar imágenes, recibir los fotogramas e iniciar la proyección de patrones hacia la segunda pantalla (proyector). A su vez, invoca a reconstruction_methods para procesar las imágenes capturadas y generar la reconstrucción 3D.

Fig. 7. Ventana StartScanningWindow

CapturesWindow: Funciona como una galería para visualizar, gestionar y seleccionar reconstrucciones previamente guardadas. Su lógica se enfoca en la carga de datos desde el sistema de archivos y la presentación de los mismos al usuario.

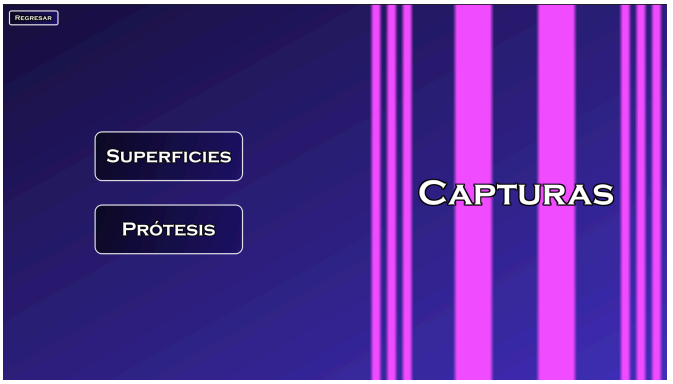


Fig. 8. Ventana CapturesWindow

La comunicación entre la lógica de la ventana (p. ej., MainWindow.py) y su diseño visual (mainwindow.ui) se logra cargando la UI generada y conectando las señales de los widgets (p. ej., boton_iniciar.clicked) a métodos específicos de la clase (slots). Estos métodos encapsulan la lógica de la aplicación, invocando a los servicios del core y utilizando el NavigationService para coordinar el flujo de la interfaz de usuario, demostrando una clara aplicación del principio de Responsabilidad Única.

2.3 Validación y análisis de resultados

La fase de validación consistió en la captura de datos tridimensionales de modelos de prueba mediante el sistema desarrollado. Estos datos fueron procesados dentro del software para generar reconstrucciones 3D precisas, verificando la fidelidad del modelo matemático implementado.

Los resultados obtenidos demostraron la capacidad del sistema para realizar reconstrucciones tridimensionales con alta resolución y estabilidad, confirmando la coherencia entre el diseño experimental y la arquitectura de software.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

La fase de prototipado del sistema ha culminado con la validación exitosa de la cadena completa de procesamiento, desde la captura de imágenes hasta la materialización de un objeto físico. El software desarrollado ha demostrado ser capaz de procesar los patrones de franjas capturados para generar nubes de puntos y mallas 3D coherentes de la anatomía torácica. Las Figuras 3 y 4 muestran el modelo digital reconstruido y el objeto físico impreso en 3D, evidenciando la correspondencia entre ambos.

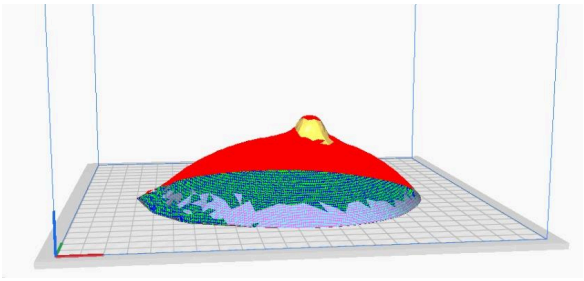


Fig. 9. Malla 3D del seno reconstruido.

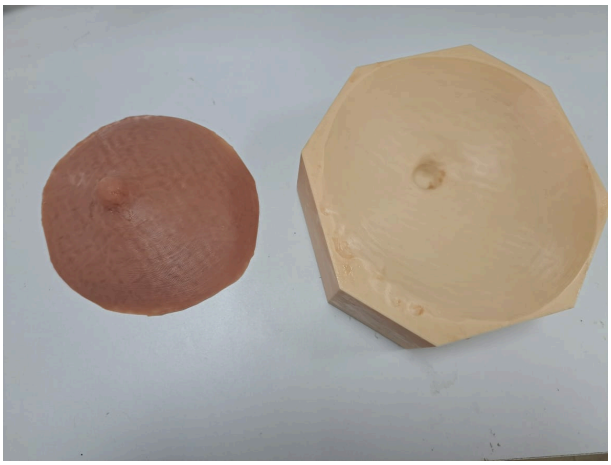


Fig. 10. Molde negativo impreso en 3D (derecha) generado a partir de la reconstrucción digital, y la prótesis de silicona final (izquierda) creada con dicho molde.

El resultado más significativo hasta la fecha es la creación de un modelo de prótesis mamaria que alcanzó una alta fidelidad con la anatomía de referencia. Una vez impreso en 3D, se comparó volumétrica y morfológicamente y se notó una gran similitud en forma y tamaño. Este nivel de precisión, obtenido con hardware de bajo costo (una cámara y un proyector comercial), valida la viabilidad de la perfilometría óptica como una alternativa accesible a los escáneres láser de grado médico. La Figura 4 muestra el objeto físico impreso en 3D.

3.1 Discusión

Estos hallazgos son prometedores y sugieren un impacto potencial significativo en el campo de las prótesis personalizadas. La principal contribución de este trabajo es ofrecer una solución que equilibra la alta precisión con la accesibilidad económica. Si bien el sistema está diseñado para ser utilizado en un entorno clínico controlado para garantizar la calidad y precisión del resultado, su bajo costo y la utilización de componentes comerciales facilitan su replicación en hospitales y clínicas especializadas.

El proceso de adquisición es rápido y no invasivo, sin requerir contacto físico con la paciente. Sin embargo, para asegurar la fidelidad métrica, el protocolo exige un entorno controlado donde se respeten estándares de calibración geométrica (cámara-proyector-plano de referencia) y se mantengan distancias específicas. Las mediciones del mundo real son cruciales para escalar correctamente el modelo digital, asegurando que la prótesis final tenga las proporciones exactas. A pesar de estos requisitos técnicos, la implementación del servicio no demanda grandes espacios ni equipos altamente especializados, lo que lo convierte en una opción viable para ampliar la oferta de prótesis personalizadas.

3.2 Limitaciones y Futuras Investigaciones

Como prototipo funcional, el sistema presenta limitaciones que definen las próximas líneas de investigación. La principal área de mejora es la formalización de un protocolo de calibración y medición estandarizado. La destacable precisión en fase de prototipo es alentadora, pero para alcanzar un estándar clínico robusto, es fundamental refinar este protocolo para minimizar las distorsiones métricas y garantizar la repetibilidad entre diferentes sesiones y operadores.

Asimismo, los algoritmos de procesamiento, aunque funcionales, pueden ser optimizados. Se explorará la implementación de filtros de ruido avanzados y técnicas de desenvolvimiento de fase más robustas como las técnicas temporales para manejar zonas de sombra o baja reflectividad. Finalmente, el siguiente paso crucial será la validación con un grupo de pacientes reales dispuestas a participar en el proyecto, siendo los primeros casos de estudio de anatomías reales que servirán para futuras mejoras del sistema, asegurando la precisión y fiabilidad del software en un contexto clínico real.

4. CONCLUSIONES

El proyecto presentado ha logrado desarrollar un sistema integral para la creación de prótesis mamarias personalizadas mediante la técnica de perfilometría por proyección de franjas, complementado con un software intuitivo, accesible y adaptable a distintos entornos clínicos. Esta propuesta representa un avance significativo al abordar una necesidad real y poco atendida en el estado de Zacatecas, donde la oferta de prótesis convencionales no contempla las variaciones anatómicas individuales ni las condiciones

emocionales de las pacientes que han atravesado una mastectomía.

Los resultados obtenidos durante la fase experimental con modelos de prueba mostraron que el método implementado es capaz de capturar y reconstruir con alta precisión superficies tridimensionales complejas, generando modelos digitales de alta fidelidad que pueden emplearse directamente en procesos de impresión 3D. Esta precisión garantiza que las prótesis resultantes se adapten mejor a la morfología del cuerpo femenino, contribuyendo así a la comodidad, estética y bienestar psicológico de las usuarias.

Asimismo, el desarrollo del software con una interfaz amigable facilita la operación del sistema incluso por personal sin formación médica especializada, permitiendo su implementación en laboratorios, clínicas o centros de rehabilitación con recursos limitados. Esta característica convierte la herramienta en una alternativa viable y escalable para ampliar el acceso a tecnologías de reconstrucción personalizada.

Finalmente, este trabajo sienta las bases para futuras mejoras, como la integración de algoritmos de inteligencia artificial para el ajuste automático de parámetros de reconstrucción, la optimización de los tiempos de procesamiento y la validación clínica con pacientes reales. En conjunto, el sistema desarrollado constituye un paso importante hacia la democratización de la tecnología biomédica aplicada a la reconstrucción postmastectomía, promoviendo una atención más humana, precisa y equitativa.

REFERENCIAS

[1] Kang, S. & Choi, G. (2024) ‘Cross-cultural adaptation and validation of the Korean version of the body image after mastectomy scale’, Seminars in Oncology Nursing, 40(1), p. 151576.

[2] Zohra, A., Raisa, B. & Sharifa, L. (2017) ‘Women experiences of using external breast prosthesis after mastectomy’, Asia-Pacific Journal of Oncology Nursing, 4(3), pp. 250–258.

[3] Lai, H., Chen, D., Liu, L., Xu, F., Wang, J., Feng, J. & Shao, Z. (2024) ‘Robotic versus conventional or endoscopic-assisted nipple-sparing mastectomy and immediate prosthesis breast reconstruction in the management of breast cancer: a prospectively designed multicenter trial comparing clinical outcomes, medical cost, and patient-reported outcomes’, Annals of Surgery, 279(1), pp. 138–246.

[4] Wiedemann, R. & Schnepp, W. (2017) ‘External breast prostheses in post-mastectomy care in Germany: women’s experiences. a qualitative study’, Central European Journal of Nursing and Midwifery, 8(3), pp. 658–666.

[5] Crompvoets, S. (2012) ‘Prosthetic fantasies: loss, recovery, and the marketing of wholeness after breast cancer’, Social Semiotics, 22(1), pp. 107–121.

[6] Burnes-Rudecino, S., Rodríguez-Juárez, P., Baltazar, R., Villa, J., Moreno, G. & De la Rosa, I. (2025) ‘Satisfaction in external breast prostheses: a case study in Zacatecas, Mexico’, Gaceta Mexicana de Oncología, 24(2), pp. 76–85.

[7] Gorthi, S.S. & Rastogi, P. (2010) ‘Fringe projection techniques: whither we are?’, Optics and Lasers in Engineering, 48(2), pp. 133–140.

[8] Ghiglia, D. & Romero, L. (1994) ‘Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods’, Journal of the Optical Society of America A, 11, pp. 107–117.

Real-time Mexican Sign Language Digital Interpreter for Healthcare

González-Montalvo D.C.*; Galicia-Méndez M.E.*; Hernández-Cortés E.*; Rojas-Aragón J.M*.

Granados Sánchez A.**

Instituto tecnológico de Tehuacán CP. 75770
(L21360189@tehuacan.tecnm.mx, L21360184@tehuacan.tecnm.mx, elsa.hc@tehuacan.tecnm.mx, L24361197@tehuacan.tecnm.mx).

Instituto tecnológico de Tehuacán CP. 75770

(angelica.gs@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: This project presents a real-time digital Mexican Sign Language interpreter for the healthcare sector, an inclusive technological innovation designed to interpret Mexican Sign Language (MSL) into speech in real time, facilitating communication between deaf people and healthcare professionals. The project addresses one of the most persistent challenges in healthcare accessibility: the lack of interpreters and inclusive communication mechanisms for patients with hearing impairments. By integrating computer vision and artificial intelligence, it captures hand, face, and body movements through the holistic MediaPipe model and processes them using an LSTM neural network trained to recognize medical signs. The system interprets these movements into speech, enabling effective and autonomous communication during medical consultations. Development followed a user-centered methodology based on the principles of Design Thinking, with an emphasis on empathy, co-creation, and iterative testing. Ten deaf participants and five healthcare professionals collaborated throughout the process, providing feedback that guided the refinement of the prototype. Experimental results demonstrated an average recognition accuracy of 91% and a response time of approximately 1.8 seconds under optimal lighting conditions. Users highlighted the tool's ease of use, reliability, and potential to improve the quality of healthcare interactions by reducing dependence on interpreters. Beyond its technical achievement, this interpreter embodies a social commitment to equity and dignity. Its portability and scalability make it ideal for hospitals, clinics, and telemedicine settings, especially in underserved regions. This project illustrates how artificial intelligence, guided by ethical and human-centered design, can become a bridge to inclusive healthcare systems. By combining innovation, empathy, and accessibility, it helps transform medical communication and ensure that every patient, regardless of their hearing ability, can be heard and understood.

Keywords: inclusion, health, artificial intelligence, accessibility.

1. INTRODUCCIÓN

La inclusión de personas con discapacidad auditiva en el sector salud representa un reto a nivel mundial, y especialmente en países como México, donde se sabe que no se cuenta con una infraestructura que contemple la diversidad comunicativa de la población. Según datos del INEGI más de 2.3 millones de mexicanos presentan pérdida auditiva y utilizan Lengua de Señas Mexicana como su medio principal de comunicación. Sin embargo, el acceso a servicios de salud inclusivos se ve limitado debido a la escasez de intérpretes certificados con menos de 80 en el país según datos del Instituto Mexicano de Lengua de Señas. Esta barrera comunicativa provoca tratamientos inadecuados, diagnósticos imprecisos y una atención excluyente, lo cual impacta de manera significativa la calidad de vida, la autonomía y privacidad de los pacientes sordos.

La Organización Mundial de la Salud, proyecta que, para el año 2050, más de 2,500 millones de personas en todo el mundo tendrán algún grado de pérdida auditiva. Debido a esta gran estimación es necesario generar soluciones tecnológicas que den respuesta a esta necesidad desde una perspectiva de innovación, accesibilidad y equidad. (OMS, 2025)

Se propone un intérprete digital en tiempo real de LSM a voz y viceversa. Está basado en visión por computadora, redes neuronales, inteligencia artificial y aprendizaje automático, estas herramientas permiten crear sistemas inteligentes que interpretan y traducen gestos, movimientos y señas en tiempo real. El objetivo es reducir la dependencia de intérpretes humanos, así mismo mejorar la precisión de diagnósticos, promover la inclusión en la atención médica y garantizar la privacidad de pacientes sordos.

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en los principios de diseño que están centrados en el usuario y en metodologías como el *Design Thinking*, esta prioriza la empatía, la ideación y la validación constante con los usuarios finales. (Brown, T. (2009)) Desde este punto de vista, gracias a la investigación se combina el rigor técnico con la sensibilidad social, buscando resolver un problema de comunicación, y al mismo tiempo promover la dignidad y la autonomía de las personas sordas.

1.1 Estado del Arte

El campo de la Inteligencia Artificial (IA) ha impulsado avances significativos en la interpretación automática de lenguas de señas. La investigación actual se concentra en dos estrategias fundamentales:

1. Sistemas basados en sensores: Estos prototipos operan mediante el uso de hardware externo, como guantes o brazaletes, equipados con sensores de flexión y posición. Aunque logran una alta precisión en el reconocimiento dactilológico, su viabilidad práctica se ve limitada. Los dispositivos presentan restricciones en portabilidad y comodidad para el usuario, y lo más relevante, son ineficaces para la captura de los rasgos no manuales (expresiones faciales y movimientos corporales), los cuales son esenciales para la estructura gramatical y la semántica completa de la LSM. (Reyes-García, A. and Pantoja-Espinoza, J. (2018))
2. Sistemas basados en visión por computadora: Este enfoque emplea cámaras estándar y algoritmos de Visión por Computadora y *Deep Learning* para la detección y el reconocimiento gestual. Al tratar la comunicación como un fenómeno multimodal, estos sistemas consiguen analizar simultáneamente el movimiento de las manos y las expresiones del rostro, ofreciendo una interpretación lingüísticamente más fiel y completa de la LSM en tiempo real. (Pérez, R.A. and Rincón, A.E. (2023)).

El desarrollo de un intérprete funcional y de baja latencia en el sector salud exige una arquitectura tecnológica robusta. La elección del enfoque recae en la integración del modelo Holistic de MediaPipe con Redes Neuronales LSTM. (Grishchenko, I. & Bazarevsky, V., 2020). (Tabla 1).

MediaPipe se utiliza para la detección integral de coordenadas tridimensionales del cuerpo, rostro y manos, asegurando que los rasgos no manuales sean capturados y procesados. Posteriormente, esta información es analizada por la red neuronal LSTM (Long Short-Term Memory). Las LSTM son idóneas porque manejan la naturaleza secuencial y dinámica de los gestos, un requerimiento clave para el reconocimiento de señas. Esta sinergia técnica garantiza no solo una alta precisión en el reconocimiento de patrones gestuales, sino también la capacidad de operar en tiempo real, un factor imperativo para la atención médica oportuna.

La revisión de la literatura evidencia una brecha de conocimiento crucial que valida la necesidad de esta investigación. Mientras la IA ha avanzado en la traducción del alfabeto o vocabulario general, existe una marcada carencia de sistemas de interpretación digital que satisfagan condiciones esenciales:

1. Estar centrados y validados en el léxico clínico especializado de la LSM.
2. Ser portátiles y accesibles (utilizando cámaras estándar) con pruebas de validación empírica de la funcionalidad en tiempo real dentro de entornos sanitarios.

2. METODOLOGÍA

El presente proyecto se abordó bajo un paradigma de investigación aplicada con una doble orientación: tecnológica y social. Esta aproximación permitió movilizar el conocimiento científico y la ingeniería de software para resolver una problemática real: la crítica barrera de comunicación que enfrentan los pacientes usuarios de la Lengua de Señas Mexicana (LSM) en el entorno clínico. El propósito fue implementar y validar un sistema tecnológico capaz de funcionar como un intérprete digital bidireccional en tiempo real, facilitando la comunicación fluida y digna entre el paciente y el personal de salud.

El diseño de la investigación fue de naturaleza exploratorio-descriptiva. Se optó por un enfoque exploratorio para mapear el contexto social, clínico y tecnológico de la problemática, y descriptivo para caracterizar el rendimiento, funcionalidades y limitaciones del prototipo durante las fases de prueba. La investigación se calificó como no experimental, dado que se observaron los fenómenos de interacción sin manipular variables controladas, basándose en la realidad operativa del sistema en escenarios simulados. La concepción del sistema se fundamentó en la metodología Design Thinking, priorizando la empatía y la validación iterativa con los usuarios finales.

La población de interés incluyó a usuarios sordos de LSM, profesionales médicos sin dominio de la lengua de señas, y desarrolladores. Se seleccionó una muestra no probabilística por conveniencia compuesta por 10 personas sordas y 5 profesionales de la salud. Esta muestra fue esencial para obtener una retroalimentación directa y realizar pruebas de campo que mejoraran el sistema basándose en interacciones reales.

Para la recolección de datos, se combinaron técnicas cualitativas y cuantitativas. En el ámbito social, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a los usuarios sordos para indagar sobre sus experiencias previas y necesidades comunicativas en el sector salud. Además, se distribuyeron encuestas cerradas al personal médico para calibrar su disposición hacia el uso de tecnologías inclusivas.

El sistema fue diseñado como un intérprete y no solo como un traductor estático, enfocándose en la velocidad de la ejecución

(*real-time*) para un contexto médico crítico. La arquitectura técnica se basa en dos pilares:

- Visión por Computadora y Detección Gestual: Se utilizó el modelo MediaPipe Holistic para la captura de poses. Esta herramienta permitió el rastreo y la extracción de coordenadas tridimensionales de las manos, el rostro y el cuerpo simultáneamente. Esto fue crucial, ya que la LSM requiere la lectura de los rasgos no manuales (gesticulación) junto con los movimientos manuales. (Fig 1).

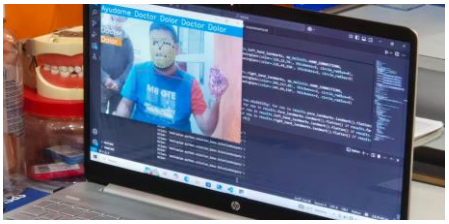


Fig. 1. Visualización del sistema durante el reconocimiento en tiempo real de señas.

- Aprendizaje Profundo para Secuencias: Las coordenadas extraídas alimentaron una Red Neuronal tipo LSTM (Long Short-Term Memory). Esta arquitectura es óptima para el reconocimiento de patrones y dependencias temporales inherentes a las señas dinámicas. La red fue entrenada con una base de datos propia de videos y etiquetas, recopilada con la colaboración de usuarios sordos e intérpretes certificados, garantizando un vocabulario pertinente para el contexto de salud. (Tabla 1).

Tabla 1. Arquitectura de Red Neuronal (Propuesta)

Componente	Capa/Tipo	Funcion Principal
Capa de entrada	Input	Recibe la secuencia de keypoints con forma (30, 258)
Capa de movimiento	LSTM (Long Short-Term Memory)	64 unidades. Captura las dependencias temporales y las relaciones de movimiento a largo plazo dentro de las secuencias de 30 frames.
Capa de movimiento avanzada	LSTM	128 unidades. Profundizada la extracción de características secuenciales.
Capa de Reducción	Dense	64 unidades. Reduce la dimensionalidad de las características secuenciales aprendidas.
Capa de salida	Softmax (Dense)	5 unidades. Produce la probabilidad de cada una de las 5 clases.
Función de pérdida	Categorical Cross-Entropy	Estándar para la clasificación de multiclase.

Tabla 2. Conjunto de Datos

Aspecto	Detalle
Tamaño total	El conjunyo de datos estará compuesto por 150 secuencias de video, con un total de 4,500 frames capturados.
Clase/ Acciones	Se clasifican 5 acciones (o señas): “dolor de cabeza”, “estreñimiento”. “fiebre”, “inflamación” y “ayudame”.
Balance	El dataset es balanceado con 30 secuencias de 30 frames por cada una de las 5 clases.
Procesamiento	Cada frame se procesa utilizando MediaPipe Holistic para extraer 258 keypoints de la pose, mano izquierda y mano derecha. Estos keypoints se concatenan para formar un vector de características de 258 dimensiones por frame.
División de datos	La división se realiza a nivel de frecuencias: - Entrenamiento (Train): 60% de las secuencias (90 secuencias). -Validacion (Validation): 20% de las secuencias (30 secuencias). - Prueba (Test): 20% de las secuencias (30 secuencias).

Esquema de flujo del entrenamiento

El entrenamiento sigue un ciclo de **Preprocesamiento → División → Modelado → Evaluación.**

- **Captura y Preprocesamiento:** Los videos se capturan y se transforman en secuencias numéricas de keypoints usando MediaPipe, asegurando que cada secuencia tenga una longitud fija de 30 frames.
- **División de Datos:** El conjunto total de secuencias se divide en los subconjuntos de Entrenamiento, Validación y Prueba para garantizar la independencia de la evaluación.
- **Entrenamiento del Modelo:** El modelo **LSTM Secuencial** se entrena usando el conjunto de entrenamiento.

- **Validación Cruzada Simplificada:** Se utiliza el conjunto de **Validación** después de cada epoch para monitorear el sobreajuste (overflitting) y ajustar hiperparámetros (early stopping).
- **Evaluación Final:** El modelo con el mejor rendimiento en validación se evalúa de manera única en el conjunto de **Prueba (Test)** para reportar las métricas finales.

Para contextualizar el desempeño de la arquitectura LSTM Secuencial es útil compararla con modelos comunes para el reconocimiento de actividades/señas.

Arquitectura de la IA	Ventajas	Desventajas	Escenarios de uso
LSTM Secuencial (Propuesta)	Excelente en la captura de dependencias de tiempo y la robustez del movimiento de keypoints. Simple y rapido de entrenar	No aprovecha las características espaciales de frame.	Proyectos basados en la extraccion de keypoints de MediaPipe
CNN + GRU/LSTM	Las CNN extraen características espaciales de la imagen (la forma de la mano, el fondo), que luego las GRU/LSTM procesan temporalmente.	Requiere entrenamiento en la GPU con imágenes de alta resolución, lo que es mucho mas costoso y lento	Se usa cuando la información de fondo o textura es crítica.
Transformers	Lo más avanzado. Utiliza mecanismos de atención para entender la relación entre frames no adyacentes de manera eficiente.	Requiere un **volumen de datos masivo** y es computacionalmente el más caro de entrenar.	Proyectos con *datasets* de decenas de miles de videos y la máxima precisión requerida

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante el desarrollo y validación del intérprete, demuestra aceptación por parte de los usuarios además de un alto impacto en el sector médico para ser más inclusivo. Mediante pruebas funcionales, encuestas, entrevistas y análisis estadísticos, sé logró evaluar el desempeño del prototipo además de su recepción en entornos clínicos simulados.

Debido a su disponibilidad inmediata se anticipa una mayor accesibilidad al servicio de esta manera se espera superar la dependencia de intérpretes humanos y así reducir el tiempo de espera y una atención más eficiente y privada, promoviendo la inclusión y equidad.

Los resultados iniciales demostraron la viabilidad y aceptación del intérprete, con una precisión promedio del 91% en la interpretación del vocabulario especializado y un tiempo de respuesta inferior a 2 segundos. Los usuarios destacaron el alto impacto potencial del sistema en la inclusión y equidad del sector médico, aunque el análisis identificó áreas de mejora en el manejo de señas de alta velocidad y la robustez del sistema en condiciones de iluminación no ideales. La metodología, al integrar la validación técnica con la perspectiva social, permitió no solo desarrollar un prototipo funcional, sino también confirmar su alto potencial de impacto social.

- Precisión del Reconocimiento Gestual: Se evaluó comparando la salida textual del sistema con la interpretación correcta validada por un intérprete profesional certificado.
- Tiempo de Respuesta (Latencia): Se cronometró el tiempo desde la finalización del gesto hasta la aparición del texto o la emisión de la voz.
- Satisfacción del Usuario: Se midió la experiencia de uso (usabilidad y utilidad percibida) a través de encuestas con escala Likert.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo y la validación funcional del Intérprete Digital de LSM han permitido avanzar significativamente en la comprensión de cómo las tecnologías emergentes, específicamente la inteligencia artificial y la visión computacional, pueden aplicarse de manera efectiva para transformar la accesibilidad en el sector salud. Esta investigación demuestra la viabilidad de una solución que opera como un mecanismo de reparación social, trascendiendo la mera innovación técnica. Estos resultados confirman la solidez del modelo MediaPipe y LSTM para el reconocimiento de señas dinámicas y multimodales, y establecen un umbral de viabilidad operativa para su uso en entornos de consulta rápida o urgencias. El impacto más significativo es de carácter humano: el intérprete fortalece la autonomía del paciente sordo al permitirle comunicarse directamente, eliminando la dependencia de terceros y garantizando la privacidad de su información médica. La alta aceptabilidad de la herramienta, con puntuaciones promedio superiores a 4.6 sobre 5 en utilidad y facilidad de uso, valida la metodología centrada en el usuario y su potencial para cerrar las brechas históricas de exclusión

en la atención sanitaria. El proyecto también reafirma el valor del enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) para la validación de tecnologías inclusivas, mostrando que es posible generar un alto impacto social con recursos accesibles y escalables (cámaras estándar y *Deep Learning*). Aunque los resultados son prometedores, se identificaron áreas claras para la optimización, como la necesidad de mejorar el rendimiento del sistema ante iluminación deficiente y alta velocidad gestual. Las futuras líneas de investigación deberán concentrarse en la expansión del repertorio de señas para incluir variaciones regionales, la integración de modelos de lenguaje natural y avatares 3D para un canal de comunicación bidireccional completo, y la realización de una fase piloto de implementación en entornos clínicos reales para evaluar la integración operativa y los desafíos normativos. La replicabilidad y escalabilidad de esta tecnología la posicionan como una contribución relevante para el avance de los derechos de las personas con discapacidad auditiva y la construcción de un sistema de salud más equitativo.

Por consiguiente, la contribución fundamental de este proyecto reside en el desarrollo y la validación de un intérprete digital LSM-voz que utiliza la arquitectura MediaPipe + LSTM para lograr la precisión multimodal y la baja latencia requeridas. Esto establece un canal de comunicación autónomo y accesible, ofreciendo una solución tecnológica que contribuye a la transformación inclusiva del sistema de salud.

REFERENCIAS

Brown, T., 2009. *Change by design: How design thinking creates new alternatives for business and society*. Harvard Business Press, Boston.

Díaz-Cortés, M.A., 2022. *Diseño de un dispositivo wearable para la traducción del lenguaje de señas mexicano.* Revista Electrónica de Investigación y Tecnología, 20(2), 45–56.

Forbes, 2023. *How telemedicine is shaping the future of healthcare*. https://www.forbes.com

Fortune Business Insights, 2023. *AI translation market size, share & growth.* https://www.fortunebusinessinsights.com

Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A., 2016. *Deep learning.* MIT Press, Cambridge, MA.

Grishchenko, I. & Bazarevsky, V., 2020. *MediaPipe Holistic — simultaneous face, hand and pose prediction, on-device*. Google Research Blog. https://research.google/blog/mediapipe-holistic-simultaneous-face-hand-and-pose-prediction-on-device

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2021. *Estadísticas a propósito del Día Internacional de las Personas con Discapacidad.* https://www.inegi.org.mx

Nussbaum, M., 2006. *Frontiers of justice: Disability, nationality, species membership*. Belknap Press, Cambridge, MA.

Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2006. *Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad.* https://www.un.org/disabilities/documents/convention/convoptprot-s.pdf

Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2019. *Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad*. https://www.un.org/disabilities

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2025. *Informe mundial sobre la audición*. https://www.who.int

Osterwalder, A., Pigneur, Y., Bernarda, G. & Smith, A., 2014. *Diseñando la propuesta de valor: Cómo crear los productos y servicios que tus clientes están esperando.* Deusto, Bilbao.

Pérez, R.A. & Rincón, A.E., 2023. *Uso de la inteligencia artificial para la traducción de lenguajes de señas: una revisión sistemática de literatura.* Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, 18(1), 33–42.

Reyes-García, A. & Pantoja-Espinoza, J., 2018. *Metodología para estandarizar reconocimiento de dactilología en Lengua de Señas Mexicana mediante un guante multisensorial.* Congreso Internacional de Ingeniería, México.

Review of Noninvasive Techniques for the Early Detection of Cognitive Impairment in Older Adults

Alvares González, Martha Betsabé *,
Astorga Zaragoza, Carlos Manuel *,**Ramírez Rasgado, Felipe** **,
Martínez Vázquez, Daniel Librado **, **Hernández González, Omar** ***

* *Tecnológico Nacional de México (TecNM)-CENIDET, México, C.P. 62493 (e-mail: {m25ce073,carlos.az}@cenidet.tecnm.mx).*
** *Departamento de Procesos Productivos, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Lerma, México, C.P. 52005 (e-mail: {f.ramirezr,d.martinez}@correo.ler.uam.mx)*
*** *Tecnológico Nacional de México (TecNM)-I.T. Hermosillo, México, C.P. 83170 (e-mail: omar.hernandezg@hermosillo.tecnm.mx)*

Abstract: Cognitive impairment represents a significant health challenge affecting millions of individuals worldwide, particularly older adults. Early detection can be achieved through a variety of methods,classified as invasive or non-invasive. Effectively addressing this issue requires a comprehensive understanding of the underlying causes of cognitive decline, a systematic evaluation of available assessment tools and their applications, and an emphasis on the usage of reliable non-invasive techniques.

Keywords: Software development, Alzheimer, MCI, Serious games, Medical, Dementia, Cognitive impairment.

1. INTRODUCTION

Se estima que actualmente hay unos 8,200 millones de personas en el mundo. Según la OMS, la demencia afecta alrededor de 55 millones de personas en todo el mundo (0.67 % de la población mundial) y cada año se registran cerca de 10 millones de nuevos casos.

Esta condición constituye una de las principales causas de dependencia y muerte entre los adultos mayores. También predice que para 2050, aproximadamente 139 millones de personas vivirán con demencia (Colombo et al., 2024).

Una de las causas más comunes del Alzheimer (EA) es el deterioro cognitivo leve. Se sabe que hasta el 80% de los pacientes con DCL (MCI en inglés) progresan a demencia por EA dentro de los 6 años del diagnóstico, lo que equivale a una tasa de conversión del 10 al 15% anual (Jang et al., 2024).

El deterioro cognitivo es un indicador de resultados negativos a largo plazo y representa riesgos como por ejemplo, durante las hospitalizaciones. De acuerdo a un estudio en Países Bajos (Schouten et al., 2025), 46% de los pacientes hospitalizados mayores (70 años o más) presentaban deterioro cognitivo. Las consecuencias pueden llevar a la discapacidad permanente o muerte.

Además de que el DCL puede resultar en EA, esta puede llevar a cierto tipo de demencia. Por ello es importante una detección temprana del deterioro cognitivo leve, sin embargo los métodos tradicionales pueden llegar a ser costosos y no accesibles para todos.

Si bien, ya existen métodos de entrenamiento y evaluación cognitiva, como los juegos serios, se piensa en un sistema de evaluación y detección de DCL no invasivo, accesible y mejorado para una mejor precisión de detección.

2. DETERIORO COGNITIVO LEVE (DCL)

El deterioro cognitivo leve es una etapa temprana de pérdida de memoria u otra pérdida de capacidad cognitiva, ya sea lenguaje, o percepción visual, espacial, o alteraciones motoras no significativas. Debe aclararse que no es lo mismo a demencia, Alzheimer u otro padecimiento neurológico, sin embargo, estos pueden ser el resultado de un DCL. Cabe resaltar que algunas personas con deterioro cognitivo leve nunca empeoran o incluso mejoran.

2.1 Causas del DCL

- Acumulaciones o placas de proteína beta-amiloide y ovillos neurofibrilares de proteínas tau que se observan en la enfermedad de Alzheimer. Las placas beta-amiloides interrumpen la comunicación entre neuronas y activan la respuesta inflamatoria del cerebro. Así mismo, inducen estrés oxidativo y muerte neuronal progresiva. Los ovillos neurofibrilares son acumulaciones anormales de la proteína tau dentro de las neuronas. Esta proteína normalmente ayuda a estabilizar los microtúbulos, que se encargan de transportar nutrientes y mantienen la forma de la célula neuronal.
- Acumulaciones microscópicas de cuerpos de Lewy. Estas masas se asocian a la enfermedad de Parkinson,

la demencia con cuerpos de Lewy y a veces, a la enfermedad de Alzheimer. Los cuerpos de Lewy son acumulaciones anormales de la proteína alfa-sinucleína dentro de las neuronas. Esta proteína participa normalmente en la liberación de neurotransmisores y en la comunicación entre las células nerviosas.

- Pequeños accidentes cerebrovasculares o reducción del flujo de sangre a través de los vasos sanguíneos del cerebro.

2.2 Cambios relacionados con el DCL

- Disminución del tamaño del hipocampo, una región del cerebro esencial en los procesos de memoria, aprendizaje y asociación de experiencias nuevas.
- Mayor tamaño de los ventrículos, cavidades interconectadas dentro del cerebro donde se produce, circula y almacena el líquido cefalorraquídeo (LCR). El LCR protege al cerebro de golpes, mantiene la presión intracraneal estable y elimina deshechos metabólicos.
- Uso reducido de glucosa en regiones clave del cerebro. La glucosa es el azúcar que constituye la principal fuente de energía de las células.

Existen otras enfermedades y factores en el estilo de vida relacionados al riesgo de presentar cambios en el pensamiento, tales como diabetes, presión arterial alta, colesterol alto, obesidad, depresión, tabaquismo, apnea obstructiva del sueño, pérdida auditiva y de la visión sin tratar, lesión cerebral por traumatismo, falta de actividad física, poca educación académica, falta de actividades mental o socialmente estimulantes y exposición a la contaminación del aire.

De acuerdo a diferentes estudios, cerca del 1% al 3% de los adultos mayores desarrollan demencia cada año. Los mismos indican que alrededor del 10% al 15% de las personas con deterioro cognitivo leve desarrollan demencia (Pose and Manes, 2025).

3. DEMENCIA

De acuerdo a la definición dada por la World Health Organization (2025), la demencia es un término general que abarca diversas enfermedades que afectan la memoria, otras capacidades cognitivas y el comportamiento, interfiriendo significativamente en la capacidad de una persona para realizar sus actividades cotidianas. No es una parte normal del envejecimiento, sin embargo, la edad es el factor de riesgo más importante para desarrollarla.

Según Colombo et al. (2024), actualmente 55 millones de personas en todo el mundo son afectadas por la demencia, y se estima que para el 2050 aproximadamente 139 millones de personas vivirán con ella. Hasta finales de 2024 en México, se ha reportado que existe una prevalencia de 16% para DCL y 8.6% para demencia (Magallón-Zertuche et al., 2024).

La demencia y el DCL están estrechamente relacionados, pero no son lo mismo. Las personas con DCL presentan alteraciones cognitivas objetivas, pero mantienen su independencia funcional. Cuando estas alteraciones progresan hasta afectar la autonomía, el diagnóstico pasa a ser demencia. El riesgo es mayor cuando el DCL afecta la memoria (de tipo amnésico).

La detección temprana de DCL es de suma importancia ya que permite identificar factores de riesgo modificables, pues en esta etapa inicial del proceso neurodegenerativo las neuronas aún no están completamente dañadas, y existen posibilidades de ralentizar o incluso detener la progresión mediante estimulación cognitiva, ejercicio, dietas, entre otros.

4. ALZHEIMER

La enfermedad de Alzheimer (EA) es el tipo más común de demencia (Magallón-Zertuche et al., 2024), es progresiva y es causada por daño a las neuronas responsables de la memoria, lenguaje y pensamiento. Las personas que la padecen pueden experimentar cambios en el estado de ánimo, la personalidad o el comportamiento.

Uno de los comportamientos más preocupante es el de deambular. Los estudios indican que las personas de 65 años o más sobreviven un promedio de cuatro a ocho años después de un diagnóstico de demencia de Alzheimer, aunque algunas viven hasta 20 años (Association, 2024).

La EA presenta notables diferencias de género en cuanto a su riesgo y progresión, influenciadas por una compleja interacción de factores biológicos, genéticos y sociales (Habba et al., 2025).

El cerebro posee miles de millones de neuronas y cada una con largas ramificaciones llamadas sinapsis que permiten que cada neurona se conecte con otras. Aquí la información fluye en pequeñas ráfagas de sustancias químicas que una neurona libera y otra absorbe. Así es como las señales (base de la memoria, los pensamientos, las sensaciones, las emociones, los movimientos y las habilidades) viajan rápidamente a través del cerebro.

Toda persona que desarrolla demencia de Alzheimer experimenta inicialmente deterioro cognitivo leve (DCL), aunque podría no ser reconocido ni diagnosticado debido a la sutileza de los síntomas (Association, 2024).

Los investigadores han identificado numerosos cambios en el cerebro que pueden interferir con la señalización química y provocar problemas de pensamiento, aprendizaje y funciones cotidianas derivadas de la enfermedad de Alzheimer. La proteína beta-amiloide y tau (ovillos de tau) descritos anteriormente, desempeñan funciones diferentes en el Alzheimer.

Otro cambio cerebral asociado con la enfermedad de Alzheimer es la atrofia (disminución del volumen cerebral) resultante de la neurodegeneración y otros factores.

A medida que las personas envejecen, se presenta cierto grado de atrofia, sin embargo, en personas con demencia de Alzheimer esta condición se acelera, lo que provoca que la función cerebral no tenga la capacidad suficiente para metabolizar la glucosa que es su principal fuente de energía.

La conversión de DCL a EA es un tema que debe tratarse con seriedad, ya que casi el 80% de los pacientes con DCL resultan en EA en un plazo de seis años (Kim et al., 2024).

Es por ello que la detección temprana de esta enfermedad es esencial para su manejo oportuno.

5. MÉTODOS DE DETECCIÓN

No existe una prueba específica que permita diagnosticar el deterioro cognitivo leve (of Health, 2022). Sin embargo, en la actualidad, con el avance de la tecnología existen diferentes herramientas para la detección temprana del DCL. Estos pueden ser invasivos y no invasivos.

5.1 Métodos Invasivos

Los métodos invasivos de detección de DCL implican la obtención directa de muestras biológicas o la introducción de instrumentos en el cuerpo para analizar marcadores fisiológicos o bioquímicos asociados con el deterioro neuronal y el riesgo de demencia.

Dentro de estos métodos se encuentra el análisis de líquido cefalorraquídeo, los biomarcadores sanguíneos, las biopsias neuronales o de tejido periférico, los estudios de neuroinflamación y las pruebas genéticas.

No toda la población afectada con DCL tiene acceso a estas pruebas, siendo el costo uno de los motivos principales.

Ahí es donde radica la importancia de los métodos no invasivos, que a diferencia de los anteriores, son accesibles y no ponen en riesgo la integridad del paciente.

5.2 Métodos No Invasivos

La digitalización de la evaluación cognitiva se ha desarrollado rápidamente con los avances tecnológicos (Park et al., 2023).

Los métodos no invasivos evalúan funciones cognitivas como memoria, atención, lenguaje, orientación y funciones ejecutivas. No requieren extracciones de fluidos corporales ni procedimientos médicos invasivos y están enfocados en medir cambios cognitivos, cerebrales o conductuales mediante pruebas, imágenes o tecnología digital.

Dentro de estos métodos, además de las pruebas de detección, se incluyen aplicaciones para terapia digital (TDC) y entrenamiento cognitivo (Zang et al., 2025).

Los reportes recientes muestran un incremento sostenido en la carga global de deterioro cognitivo, especialmente en países de ingresos medios, donde la disponibilidad de herramientas de diagnóstico temprano es limitada (Naole et al., 2025).

Por esta razón se han desarrollado soluciones basadas en software y juegos cognitivos para ampliar el acceso y no requerir equipo costoso.

El cribado cognitivo es la fase inicial en la evaluación del deterioro, permite identificar si una persona presenta signos de DCL o demencia, mediante pruebas estandarizadas breves y de fácil aplicación (Cornacchia et al., 2025).

Para el cribado cognitivo se utilizan las siguientes pruebas:

(1) Montreal Cognitive Assesment (MoCA) Es una prueba de 10 minutos y 30 puntos utilizada para detectar el DCL y demencia en sus etapas iniciales. Los dominios que evalúa son atención, memoria, lenguaje, funciones ejecutivas, habilidades visoespaciales, pensamiento abstracto y orientación (Landa et al., 2023).
(2) Self-Administered Gerocognitive Exam (SAGE) Diagnostico en papel y lápiz para detectar deterioros cognitivos asociados con la demencia incluyendo el Alzheimer, en personas de 60 años o más. Evalúa comunicación, pensamiento, y orientación espacial a través del dibujo.
(3) ADAS-Cog Herramienta muy popular en los ensayos clínicos de EA. Evalúa el lenguaje, la memoria, la orientación y la praxia.
(4) RUDAS (Rowland Universal Dementia Assessment Scale) Evalúa varios dominios, incluyendo memoria, praxia, construcción visoespacial, juicio, abstracción y aspectos del lenguaje como la identificación de partes del cuerpo. Fue creado para facilitar el diagnóstico de demencia en grupos cultural y lingüísticamente diversos.
(5) MMSE (Mini-Examen del Estado Mental) Es una de las herramientas más utilizadas para evaluar las capacidades cognitivas en adultos mayores. Evalúa la orientación, registro, atención y cálculo, recuerdo, lenguaje y habilidades visoespaciales básicas. Aunque es una herramienta muy completa tiene sus limitaciones en comparación con el MoCA.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Atención	x			x	x
Memoria	x	x	x	x	x
Lenguaje	x	x	x		x
Ejecución	x	x			
Visoesp.	x	x		x	
Orient.	x	x			x

Tabla 1. Tabla de métricas - Métodos no invasivos

La Tabla 1 muestra los criterios evaluados en común de las diferentes pruebas cognitivas.

Algunos métodos no invasivos se basan en exámenes neurológicos que evalúan reflejos, movimientos oculares marcha y equilibrio. Tal es el caso del software de seguimiento ocular basado en cámara, que toma en cuenta la tasa de parpadeo y tiempo de reacción. Estas características se relacionan significativamente con puntajes en las pruebas del MoCA.

El seguimiento ocular se ha utilizado durante mucho tiempo en entornos de laboratorio controlados para evaluar procesos cognitivos, incluyendo la atención, la memoria y la función ejecutiva (Pszeida et al., 2025).

También se tiene el caso de los juegos serios o cognitivos, los cuales hacen uso de métricas digitales derivadas del desempeño del paciente, y se han consolidado como una estrategia eficaz para la detección temprana del DCL (Association, 2024).

Los parámetros como el tiempo de respuesta, la precisión en tareas y la evolución del desempeño pueden servir como biomarcadores digitales no invasivos.

La Inteligencia Artificial juega un papel muy importante dentro de estos sistemas. Los modelos de IA pueden evaluar automáticamente a las personas y facilitar el pronóstico, la planificación de la terapia y la evaluación (Kim and Themistocleous, 2024).

6. MODELO DE SISTEMA NO INVASIVO

Tomando en cuenta el enfoque y funcionamiento de los sistemas no invasivos para la detección del DCL, se ha pensado en una herramienta que involucre las mismas métricas y actividades de evaluación cognitiva.

A su vez, que haga uso de la IA o aprendizaje automático para el análisis de resultados. De acuerdo a estudios previos, se ha confirmado la eficacia de los sistemas no invasivos, por lo tanto se puede proceder al desarrollo de una aplicación innovadora y accesible para la detección temprana del DCL.

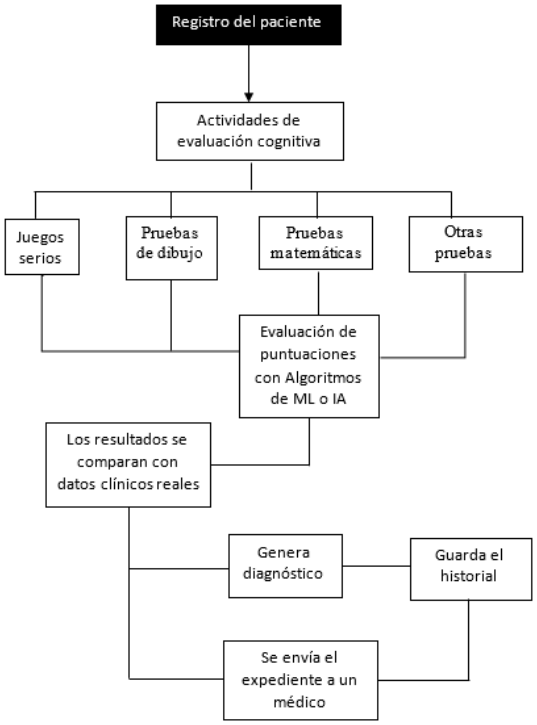


Fig. 1. Modelo de Sistema No Invasivo

En la figura 1 se muestra un diagrama del funcionamiento de un sistema de detección no invasivo que se pretende desarrollar. Incluye diversas pruebas y realiza la evaluación de acuerdo a métricas reales para después detectar anomalías en los puntajes y generar reportes del paciente.

7. LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES

Si bien estas herramientas son eficaces para la detección del DCL, se debe prestar atención a las limitaciones que se presentan. Por ejemplo, el aprendizaje automático (ML) requiere conjuntos de datos masivos y de buena calidad para permitir que los algoritmos aprendan y luego indiquen los patrones apropiados cuando se utilicen (Zawislak-Fornagiel et al., 2025).

Por otro lado, los problemas de conectividad pueden afectar a tareas realizadas durante los juegos de evaluación cognitiva, provocando que los datos obtenidos no sean reales y lleven a un análisis erróneo (Hamaguchi et al., 2025).

Otro reto es el de adaptabilidad de los adultos mayores, ya que gran parte de ellos no están familiarizados con dispositivos inteligentes, como teléfonos, tabletas, computadoras o relojes, por lo tanto debe haber un proceso de adaptación para obtener datos más certeros.

Al igual que la falta de adaptación hay otros factores que pueden llegar a afectar la evaluación cognitiva, tales como la falta de sueño, estrés, cansancio, o alguna enfermedad no grave. Por ello se debe tomar en cuenta horarios y condiciones para una evaluación precisa y con menos errores.

Hoy en día la mayoría de las personas tenemos acceso a dispositivos móviles, no obstante, aún existe una población considerable que no cuenta con ello, siendo esta una de las principales limitaciones

8. CONCLUSIÓN

El deterioro cognitivo leve es una condición que afecta a millones de personas en el mundo y está altamente relacionado a enfermedades neurológicas.

La detección temprana del DCL es crucial para tomar medidas y evitar que resulte en algún tipo de demencia o Alzheimer. Esta última es una enfermedad causada por el daño a las neuronas y afecta sobre todo a la memoria.

Los adultos mayores son los más propensos a desarrollar DCL o algún padecimiento neurológico y para detectarlo se utilizan métodos de evaluación costosos e incluso dolorosos.

Debido a esto, se han desarrollados sistemas de detección no invasivos que mejoran con el avance de la tecnología, permitiendo así que los resultados sean más precisos y con menos errores.

De todo esto, nace la propuesta de un sistema no invasivo que integre los métodos ya existentes y tome en cuenta las métricas de evaluación clínica para reducir los errores de evaluaciones en software comparados con datos reales.

Este sistema facilitará la implementación de métodos accesibles y contribuyen a la detección temprana de alteraciones cognitivas, no obstante, es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones como la adaptabilidad de los adultos mayores, los problemas de conectividad que pueden alterar los resultados, entre otros, para asegurar una mayor eficacia en el desarrollo del sistema.

REFERENCIAS

Association, A. (2024). 2024 alzheimer's disease facts and figures. *Alzheimer's & Dementia*, 20(5), 3708–3821. doi: 10.1002/alz.13809. URL `https://doi.org/10.1002/alz.13809`. Publicado online 30 de abril de 2024.

Colombo, G., Minta, K., Grübel, J., Tai, W.L.E., Hölscher, C., and Schinazi, V.R. (2024). Detecting cognitive impairment through an age-friendly serious game: The development and usability of the spatial performance assessment for cognitive evaluation (space). *Computers in Human Behavior*, 160, 108349.

Cornacchia, E., Bonvino, A., Scaramuzzi, G.F., Gasparre, D., Simeoli, R., Marocco, D., and Taurisano, P. (2025). Digital screening for early identification of cognitive impairment: A narrative review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 16(4), e70009.

Habba, S., Mian, M., Imam, M., Tahiri, J., Amor, A., and Reddy, H. (2025). Harnessing artificial intelligence for transforming dementia care: Innovations in early detection and treatment. *Brain Organoid and Systems Neuroscience Journal*, 3, 122–133.

Hamaguchi, R., Hongo, S., Doi, N., Ide, H., Saito, R., Kishimoto, J., Handa, N., and Horie, S. (2025). Prospective observational study to evaluate the feasibility of the mobile app for mild cognitive impairment detection and screening. *Frontiers in Digital Health*, 7(1535900).

Jang, H., Na, D.L., Kwon, J.C., Jung, N.Y., Moon, Y., Lee, J.S., Park, K.W., Lee, A.Y., Cho, H., Lee, J.H., et al. (2024). A two-year observational study to evaluate conversion rates from high-and low-risk patients with amnestic mild cognitive impairment to probable alzheimer's disease in a real-world setting. *Journal of Alzheimer's Disease Reports*, 8(1), 851–862.

Kim, H. and Themistocleous, C. (2024). A machine learning classification of individuals with mild cognitive impairment into variants from writing. *University of Oslo*.

Kim, S., Kim, M., eun Lee, J., yong Park, B., and Park, H. (2024). Prognostic model for predicting alzheimer's disease conversion using functional connectome manifolds. *Alzheimer's Research & Therapy*, 16(217).

Landa, C.H., Bello, P.C., García, A.E.B., and Vargas, D.J. (2023). Intervención cognitiva mediante videojuegos en adulto mayor con alzheimer: Estudio de caso. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*.

Magallón-Zertuche, V., Garrido-Dzib, A.G., Salazar-Gonzalez, E., González-Castro, D.G., Chávez-Loría, G., Avila-Nava, A., and Gutiérrez-Solis, A.L. (2024). A systematic review and meta-analysis on the prevalence of mild cognitive impairment and dementia in mexico. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 53(5), 274–287.

Naole, S., Parikh, D., Nayak, S., and Ramu, S.P. (2025). Evaluating cognitive assessment tools: A comparative analysis of mmse, rudas, sage, adas, and moca for early dementia detection. *arXiv*. doi:10.48550/arXiv.2505.07246. URL `https://arxiv.org/abs/2505.07246`. Publicado el 12 de mayo de 2025.

of Health, M..N.I. (2022). El cerebro y la memoria: entienda cómo piensa el cerebro. *NIH MedlinePlus Magazine*. URL `https://magazine.medlineplus.gov/es/art%C3%ADculo/el-cerebro-y-la-memoria`. Publicado el 19 de octubre de 2022; consultado el 10 de octubre de 2025.

Park, J.Y., Seo, E.H., Yoon, H., Won, S., and Lee, K.H. (2023). Automating rey complex figure test scoring using a deep learning-based approach: a potential large-scale screening tool for cognitive decline. *Alzheimer's Research & Therapy*, 15(Article 145). doi:10.1186/s13195-023-01283-w.

Pose, M. and Manes, F. (2025). Deterioro cognitivo leve. *Acta Neurológica Colombiana*, 26(3 Supl 1), 7–12.

Pszeida, M., Schneeberger, M., Mosbacher, J.A., Russegger, S., Orgel, T., Zweytik, E., Zweytik, S., and Paletta, L. (2025). Early detection of risk for cognitive decline using mobile apps and eye tracking-based biomarkers. *Cognitive Computing and Internet of Things*, 165, 81.

Schouten, B., Visser, F.C., van Eersel, M.E., Merten, H., van Munster, B.C., and Wagner, C. (2025). Adverse events in older hospitalized patients with cognitive impairment. *Journal of the American Medical Directors Association*, 26(10), 105800.

World Health Organization (2025). Dementia. `https://www.who.int/health-topics/dementia#tab=tab_1`. Accessed: 2025-10-11.

Zang, G.Y., Rao, K., Wu, J., Yunhan, Tang, Y., and Shi, L. (2025). Digital therapeutics for cognitive impairment: Exploring innovations, challenges, and future prospects. *Journal of Medical Internet Research*, 27(1), e73689. URL `https://www.jmir.org/2025/1/e73689`.

Zawislak-Fornagiel, K., Gorzkowska, A., Galus, W., Wĕgrzynek-Gallina, J., Ledwon, D., and Mitas, A.W. (2025). Application of quantitative eeg analysis in machine learning research on cognitive impairment in parkinson's disease: A systematic review. *Clinical Neurophysiology*, 178(2110945).

VitalFall: Biomedical Wearable Physiological Monitoring, Fall Detection and Stress Status

Jiménez Frías Dana Débora*, Mirón Arcos Itzel Romina*, Mendoza Soriano Valeria*

∗ Instituto Tecnológico de Tehuacán, 75770. (L21360200, L21360214, L21360213@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: This project introduces VitalFall, a biomedical wearable device designed for continuous monitoring of physiological parameters, focusing on fall detection and stress estimation. The compact prototype integrates an optical sensor (MAX30100) for photoplethysmography (PPG) acquisition and a 6 - axis inertial measurement unit (MPU6050) to capture motion dynamics, including acceleration and angular velocity. These sensors enable the measurement of heart rate, oxygen saturation (SpO_2), and body orientation. The acquired signals undergo pre-processing and filtering to ensure data quality. PPG signals are refined using a 4th-order Butterworth Low-Pass Filter with a zero-phase approach, effectively removing noise while preserving waveform integrity for beat-to-beat analysis. MPU6050 data are stabilized through a Complementary Filter, providing reliable orientation estimates to differentiate normal activity from true falls, based on acceleration thresholds and post-impact immobility. Signal- processing algorithms perform Heart Rate Variability (HRV) analysis in the time domain, computing SDNN and RMSSD metrics to estimate stress levels associated with autonomic activity. The system is powered by an ESP32 microcontroller, responsible for local data processing, fusion, and wireless transmission. Results are visualized in real time through an OLED display and a mobile application that manages alerts and monitoring. At this stage, VitalFall has not been externally evaluated or clinically validated. Only internal simulated tests were conducted under controlled conditions to verify module functionality and observe the preliminary behavior of detection and estimation algorithms. These findings are exploratory and form the foundation for future validation and optimization of the system.

Keywords: Biomedical wearable, Physiological monitoring, Heart rate variability, Fall detection, Stress estimation

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo continuo de parámetros fisiológicos mediante dispositivos portátiles (wearables) representa uno de los pilares de la medicina digital moderna, al favorecer la transición de un modelo de atención reactivo a uno preventivo y predictivo [1]. Esta transformación es especialmente relevante para poblaciones vulnerables, como adultos mayores o pacientes con enfermedades crónicas, quienes requieren una supervisión constante que permita la detección temprana de alteraciones fisiológicas o eventos críticos como caídas [2], [3], [9]. En este contexto, los sistemas biomédicos basados en el Internet de las Cosas (IoT) permiten la adquisición, transmisión y análisis de datos fisiológicos en tiempo real, posibilitando la toma de decisiones clínicas más informadas y oportunas [1].

La literatura reciente evidencia un progreso sustancial en el desarrollo de wearables inteligentes. Gharghan et al. (2024) [2] llevaron a cabo una revisión exhaustiva sobre la detección de caídas en adultos mayores utilizando sensores portátiles y algoritmos de aprendizaje automático, destacando su eficacia para discriminar entre actividades cotidianas y eventos de caída. De manera complementaria, Tewari et al. (2023) [3] demostraron que los sensores de bajo costo pueden emplearse no solo para identificar caídas, sino también para registrar parámetros fisiológicos posteriores al evento, lo que constituye una ventaja para la atención inmediata y el seguimiento clínico. Además, Li et al. (2025) [9] documentaron los avances más recientes en la integración de sensores inerciales y ópticos dentro de sistemas de monitoreo vestibles, consolidando su papel como herramientas viables para la prevención de lesiones y la evaluación del estado de salud en tiempo real.

Sin embargo, la mayoría de los dispositivos disponibles en el mercado se enfocan en métricas aisladas, lo que limita su capacidad de ofrecer una visión integral del estado fisiológico del usuario [8]. En respuesta a esta limitación, el presente trabajo propone el desarrollo de VitalFall, un prototipo de pulsera biomédica que combina sensores ópticos (MAX30105) y de movimiento (MPU6050) para la monitorización simultánea de frecuencia cardíaca, oxigenación periférica (SpO_2), detección de caídas y estimación del nivel de estrés mediante el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV, por sus siglas en inglés).

El análisis de HRV constituye un indicador sensible y ampliamente validado del equilibrio autonómico entre los sistemas simpático y parasimpático [4]. De acuerdo con los estándares establecidos por la Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996) [4], una disminución de la HRV refleja una mayor activación simpática asociada con estados de estrés físico o emocional. Kim et al. (2018) [5] demostraron, mediante un meta -análisis, que la Desviación

Estándar de los Intervalos NN (SDNN) es una de las métricas más consistentemente relacionadas con el estrés agudo, mientras que Castaldo et al. (2015) [6] corroboraron su validez para la evaluación del estrés mental a corto plazo.

Estudios más recientes, como los de de Vries et al. (2023) [7] y Presby (2023) [10], han confirmado la utilidad de los wearables en la estimación de HRV y su correlación con medidas subjetivas de estrés, incluso en contextos cotidianos.

En este marco, VitalFall se presenta como una propuesta innovadora al integrar la detección de caídas, el monitoreo cardiorrespiratorio y la evaluación del estrés en una sola plataforma. Este sistema busca transformar datos biomédicos en información clínicamente accionable, apoyado en algoritmos de procesamiento de señales y técnicas de análisis de HRV validadas en la literatura. El diseño, implementación y validación preliminar del prototipo se orientan hacia su aplicación en entornos clínicos, geriátricos y de telemedicina, donde la prevención y el seguimiento personalizado resultan esenciales para mejorar la calidad de vida y la atención preventiva de los usuarios.

2. METODOLOGÍA

La metodología del proyecto VitalFall se estructura en cinco etapas principals.

1. Adquisición de Señales: (Tabla 1. se presentan los materiales usados) El prototipo integra el sensor óptico MAX30100 para adquirir la señal de fotopletismografía (PPG) y calcular la frecuencia cardíaca (FC) y la saturación de oxígeno en sangre (SpO2). Simultáneamente, el acelerómetro MPU6050 registra la aceleración en tres ejes (ax, ay, az) para el análisis de movimiento.

2. Preprocesamiento: Las señales brutas son filtradas para eliminar ruido. La señal PPG pasa por un filtro pasa-bajos para aislar el componente de pulso, mientras que la señal del acelerómetro se suaviza para un análisis estable. En la figura 2 se muestra el Diagrama del sistema de medición para el procesamiento.

3. Procesamiento y Cálculo de Parámetros:

- Parámetros Cardíacos: Se detectan los picos R de la señal PPG para obtener los intervalos RR (entre latidos). A partir de estos, se calcula la FC y la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC), específicamente la

métrica SDNN (Ecuación 4).

- Detección de Caídas: Se calcula la Magnitud del Vector de Señal (SVM, Ecuación 1) a partir de los datos del acelerómetro. Se establece un umbral de impacto; si SVM supera este umbral, se triggera una alerta de caída.

- Estimación de Estado: El valor de SDNN se utiliza para estimar el nivel de estrés del usuario (un SDNN bajo sugiere mayor estrés). Se implementan reglas simples para la detección de arritmias basadas en la irregularidad de los intervalos RR. En la figura 7 se muestra la onda de midición.

- Salida y Almacenamiento: Los resultados (FC, SpO2, VFC, alertas de caída y estrés) se muestran en una pantalla integrada en el wearable. Los datos se almacenan localmente y pueden transmitirse para su posterior análisis.

- Diseño de aplicación y carcasa: Para su mejor portabilidad y acceso a los datos medidos se diseña una app para ver los datos obtenidos de la ultima medición realizada. Se puede visualizer mejor en la fig 4, 5 y 6. De igual forma se puede ver el diseño de la carcasa que va a contener el circuito, en la fig 3.

En la Figura 1 se representa mas simplificado la metodologia con un diagrama de flujo.

Fig1. Diagrama de metodología.

2.2 Tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas del prototipo VitalFall

Componente	Especificación
Microcontrolador	ESP32
Sensor de rimo cardíaco	MAX30100
Acelerómetro	MPU6050 (3 ejes)
Parámetros medidos	FC, SpO2, HVR, detección de caídas

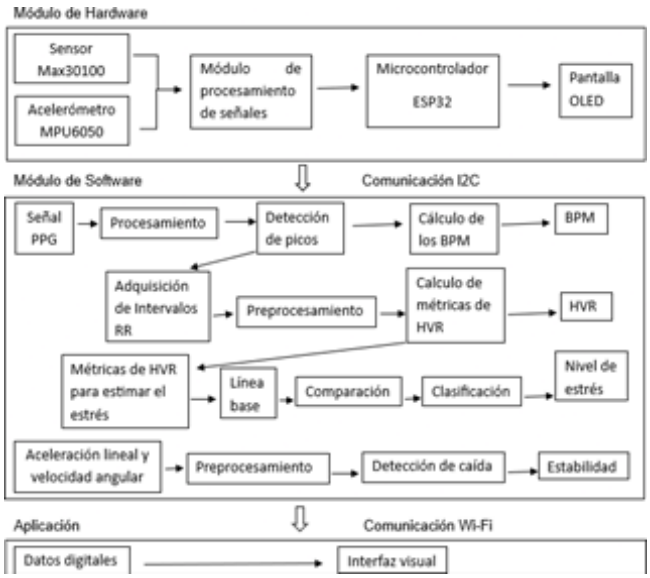


Fig. 2 Diagrama del sistema de medición

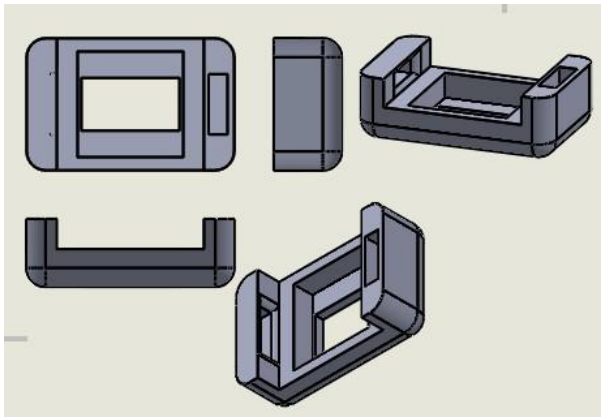


Figura 3. Diseño de carcasa

En la tabla 1 se muestran los components y sus especificaciones técnicas del prototipo, se muestra el modelo del microcontrolador, el sensor a ocupar, acelerómetro y los parámetros a medir, esto con el fin de que se pueda replicar si se desea. Al igual que se agregó el diagrama de todo el Sistema de hardware y software con la comunicación I2C (Figura 2), en el módulo de hardware se observa la conexión del sensor con el acelerómetro y su envoi de datos al modulo de procesamiento de señales, que junta los resultados, pasan por el microcontrolador y se muestran en la pantalla OLED. En el módulo de software se observa el procesamiento interno de la captación de señales, sus cálculos y como pasa a visualizarse los datos, por último, con ayuda de comunicación WiFi los datos adquiridos llegan a visualizarse en la interfaz del dispositivo. (Figuras 4, 5 y 6).

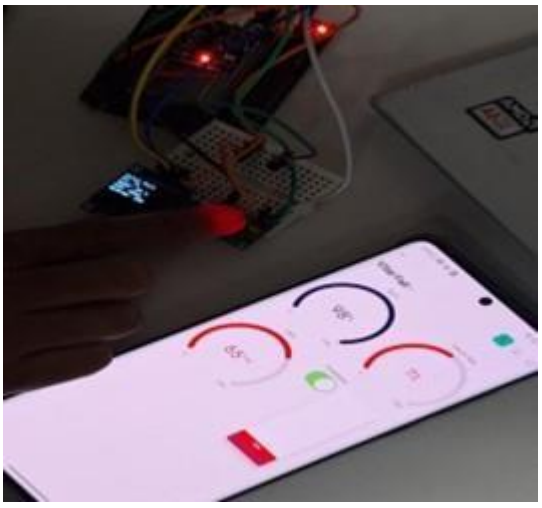


Fig. 4 Visualización de Datos

Fig. 5 Prototipo mostrando mediciones en tiempo real.

Figura 6. Interfaz de la aplicación.

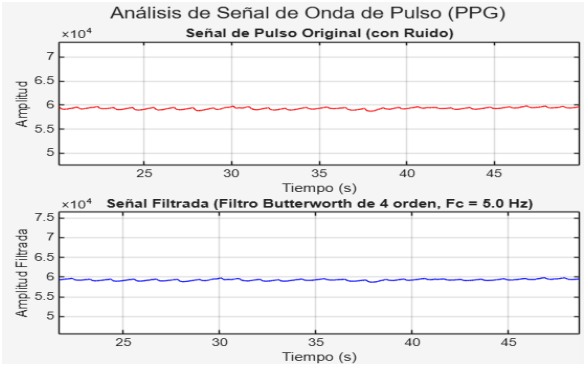


Figura 7. Señal de Onda de Pulso (PPG).

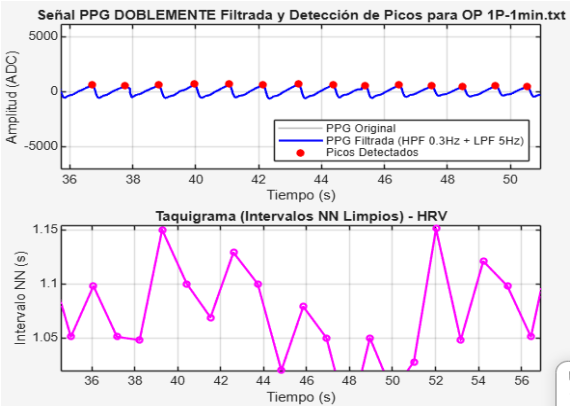


Figura 8. Detección de Picos de la Onda de Pulso.

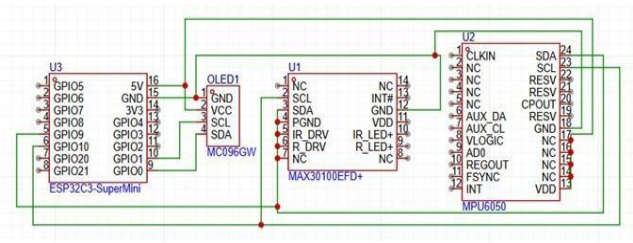


Fig. 9 Esquémtico VitallFall

2.3 Ecuaciones

La ecuación (1) y (2) es utilizada en la configuración del sensor del acelerómetro mide la aceleración en los tres ejes cartesianos ax, ay, az.

$$(1)\quad S\,SVM = \sqrt{(ax^2 + ay^2 + az^2)}$$

$$(2)\quad \theta x = tan^{-1}\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right)$$

$$(3)\quad \theta y = tan^{1}\left(\frac{a}{\sqrt{a_x{}^2 + a_z^2}}\right)$$

El sistema demostró capacidad para adquirir señales de fotopletismografía (PPG) y aceleración en tiempo real de forma estable.

Procesamiento de Señales y Algoritmos Implementados.

Para la señal PPG, se implementó un pipeline de procesamiento que incluye:

1. **Filtrado.**
2. **Detección de Picos R.**
3. **Cálculo de FC y SpO2.**
4. **Cálculo de SVM.**
5. **Detección de Impacto.**

Evaluación del Desempeño

Monitorización Fisiológica: El cálculo de la Frecuencia Cardíaca mostró una concordancia visualmente aceptable con un pulsómetro de referencia (monitor polar H10) durante periodos de reposo, observándose una diferencia promedio de ±5 lpm en pruebas preliminares estáticas. El cálculo de SpO2 mostró una tendencia coherente con los valores de referencia en condiciones de reposo. Sin embargo, se observó una degradación significativa en la precisión de ambos parámetros (FC y SpO2) durante periodos de movimiento, un fenómeno ampliamente reportado en la literatura para sensores ópticos y que está asociado al artefacto por movimiento.

Estimación de Estrés mediante HRV: El parámetro SDNN, calculado a partir de los intervalos RR (Ecuación 4), se utilizó como indicador de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca. El sistema fue capaz de detectar cambios en el SDNN en escenarios controlados, como una prueba de respiración lenta (donde la HRV típicamente aumenta) comparada con un estado de reposo normal. Estos resultados preliminares indican que el sistema es sensible a variaciones fisiológicas, aunque se requiere una validación rigurosa contra un estándar clínico, como un electrocardiógrafo, para cuantificar su precisión absoluta.

Detección de Caídas: El algoritmo basado en el umbral de SVM logró identificar correctamente la totalidad de los eventos de caída simulados (caída frontal, lateral y síncope) en un entorno de laboratorio. No se registraron falsos positivos durante la realización de actividades como caminar o sentarse lentamente. Este desempeño se alinea con los hallazgos de Tewari et al. (2023), quienes también utilizaron un enfoque basado en umbrales de aceleración con buenos resultados. No obstante, es probable que actividades más dinámicas (como saltar o trotar) puedan generar falsas alarmas, una limitación reconocida en este tipo de algoritmos.

Discusión de Limitaciones y Trabajo Futuro.

La principal limitación identificada fue la susceptibilidad del sensor óptico MAX30100 al artefacto por movimiento, lo cual concuerda con lo discutido por Gharghan et al. (2024). Para mitigar este problema, futuras iteraciones del prototipo

incorporarán técnicas de filtrado adaptativo, como el uso de la señal del acelerómetro como referencia para un filtro de cancelación de ruido.

Estos resultados podrían demostrar la viabilidad de este prototipo "VitalFall" para adquirir señales y ejecutar algoritmos básicos de procesamiento. La arquitectura general del sistema, que sigue los principios de los dispositivos IoT para la salud revisados por **Alotaibi et al. (2023)**, constituye una plataforma sólida para desarrollo futuro.

La principal limitación detectada fue la sensibilidad del sensor óptico al movimiento; se propone implementar filtros adaptativos y fusión sensorial con la señal de aceleración para compensar artefactos.

En conjunto, estos hallazgos y referencias respaldan el posible potencial de VitalFall como una plataforma de investigación y desarrollo en monitoreo preventivo, con posibles aplicaciones en telemedicina, cuidado geriátrico y seguimiento de pacientes crónicos.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño e implementación inicial de VitalFall, un wearable biomédico multifuncional orientado al monitoreo continuo de parámetros fisiológicos, la detección de caídas y la estimación del nivel de estrés. Entre los principales logros se destaca: (1) la integración efectiva de sensores ópticos y de movimiento con un microcontrolador de bajo consumo para la adquisición simultánea de señales fisiológicas y cinemáticas, (2) el desarrollo e implementación de algoritmos propios para el cálculo de frecuencia cardiaca, saturación de oxígeno, variabilidad de la frecuencia cardiaca (HRV) y detección de eventos de caída, y (3) la validación preliminar del sistema en entornos simulados, mostrando un desempeño funcional estable.

De igual forma; este proyecto hace uso de los sistemas embebidos de bajo coste para ofrecer soluciones de monitorización continua y preventiva. Como próximos pasos, se planea: optimizar los algoritmos para mejorar la precisión en condiciones de movimiento y realizar un estudio de validación con una cohorte más amplia de participantes.

REFERENCIAS

S. S. N. Alotaibi, F. A. Alharbi, M. M. Alotaibi, and A. S. Alghamdi, "IoT-based healthcare monitoring systems: A systematic literature review," J. Infect. Public Health, vol. 16, Suppl. 1, pp. S165–S174, 2023
https://doi.org/10.1016/j.jiph.2023.11.001

S. K. Gharghan, A. Al-Naji, and J. Chahl, "A comprehensive review of elderly fall detection using wearable sensors and machine learning," Measurement, vol.205, p. 114123, 2024
https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114123

R. C. Tewari, S. Verma, and P. Gupta, "Effective fall detection and post-fall physiological tracking using low- cost wearable sensors," Biocybern. Biomed. Eng., vol. 43, no. 1, pp. 1-15, 2023. https://doi.org/10.1016/j.bbe.2022.11.001

Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, "Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use," *Circulation*, vol. 93, no. 5, pp. 1043–1065, 1996.

H. G. Kim, E. J. Cheon, D. S. Bai, Y. H. Lee, and B. H. Koo, "Stress and heart rate variability: A meta -analysis and review," *Psychiatry Investig.*, vol. 15, no. 3, pp. 235–245, 2018, doi: https://doi.org/10.30773/pi.2017.08.17

R. Castaldo, P. Melillo, U. Bracale, M. Caserta, M. Triassi, and L. Pecchia, "Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: A systematic review with meta -analysis," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 18, pp. 370–377, 2015, https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.02.012

H. J. de Vries, H. J. M. Pennings, C. P. van der Schans, R. Sanderman, H. K. E. Oldenhuis, and W. Kamphuis"Wearable-Measured Sleep and Resting Heart Rate Variability as an Outcome of and Predictor for Subjective Stress Measures: A Multiple N-of-1 Observational Study," Sensors, vol. 23, no. 1, p. 332, 2023, doi:10.3390/s23010332.

K. Li, C. Cardoso, A. Moctezuma -Ramirez, A. Elgalad, and E. Perin, "Heart Rate Variability Measurement through a Smart Wearable Device: Another Breakthrough for Personal Health Monitoring," Smart Wearable Devices & Health Monitoring, 2023

Y. Li, P. Liu, Y. Fang, X. Wu, Y. Xie, Z. Xu, H. Ren, and F. Jing, "A Decade of Progress in Wearable Sensors for Fall Detection (2015–2024): A Network- Based Visualization Review," Sensors, vol. 25, no. 7,
p. 2205, 2025, doi:10.3390/s25072205.

D. M. Presby, "Wearable-derived cardiovascular responses to stressors in real-world settings," PLoS One, vol. 18, no.1, 2023, doi:10.1371/journal.pone.0285332

Wearable Plethysmograph Design

Hernandez Banda Jorge Eduardo*, Osorio Vega Lizeth Viridiana*, Solano Vargas José Alberto*

* *Instituto Tecnológico de Tehuacán, 75857.*
(e-mail: {L21360192, L21360221, LB19080530}@tehuacan.tecnm.mx)

Abstract: A plethysmograph is a diagnostic medical device whose main function is to measure changes in lung volumes and respiratory mechanics. It is primarily used to diagnose respiratory diseases such as asthma, chronic obstructive pulmonary disease, and pulmonary fibrosis, which is the focus of this research. The objective of the research was to design a portable plethysmograph that would facilitate the detection of pulmonary fibrosis in hard-to-reach communities such as Coapan, Tehuacán, Puebla. This served as a sample and control group for this project. For this task, an analysis of the main components that make up a plethysmograph was performed and subsequently, using reverse engineering, replaced them with more modern, more affordable, and, of course, smaller equivalents without affecting the main functions, always taking into account the standardized variables of the device, as well as the mathematics and filters essential for this type of mechanism. The prototype was able to measure the total lung volume resulting from a forced expiration for 6 seconds with an accuracy of more than 90%, costing in its development a fraction of what a professional instrument used for the same purpose would cost while its size was reduced to a version that anyone could hold in their hands weighing just over 600gr however by not having a standardized and monitored area that served as quality control there is the possibility of changes in the values of the variables due to unexpected environmental changes Based on the results obtained from various surveys conducted among the local population we realized the great need for this instrument, as well as the general lack of knowledge about its operation and usefulness which makes it difficult to know the exact number of possible cases of pulmonary fibrosis in the region of Coapan, Tehuacán, Puebla.

***Keywords*:** plethysmograph, wearable medical equipment, biomedical design.

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería biomédica se orienta a la aplicación de principios de la ingeniería en contextos biológicos y médicos, con el objetivo de mejorar la salud y calidad de vida humanas (Ufvseo, 2024). En este contexto, el diseño de dispositivos médicos portátiles, precisos y accesibles es esencial para el diagnóstico y monitoreo de diversas patologías (Beatriz, 2024). Este trabajo se centra en el desarrollo de un pletismógrafo portátil, enfocado particularmente en la detección y seguimiento de enfermedades respiratorias como la fibrosis pulmonar (Mayo Clinic, 2024). El pletismógrafo es un dispositivo no invasivo que permite medir variaciones en el volumen corporal, siendo especialmente útil en la evaluación de la función pulmonar y el diagnóstico de enfermedades restrictivas (Mayo Clinic, 2024). Su capacidad para determinar el volumen pulmonar total y el volumen de gas intratorácico lo convierte en una herramienta clave en la detección temprana de fibrosis pulmonar, condición caracterizada por el engrosamiento del tejido pulmonar y dificultades en el intercambio gaseoso (S. de Salud, 2025). Estudios como el de Vargas-Domínguez et al. (2024) demuestran que, aunque la espirometría y la pletismografía comparten objetivos similares, sus métodos de medición difieren, por lo que deben considerarse técnicas complementarias. La pletismografía abarca diversas modalidades no invasivas como la impedancia (IPG), la deformación mecánica (strain-gauge) y la fotopletismografía (PPG), incluyendo su versión remota (rPPG) (MedlinePlus, 2023). Cada modalidad ha evolucionado con aplicaciones específicas en contextos clínicos y de investigación. La IPG permite evaluar el flujo sanguíneo periférico y el gasto cardíaco mediante la variación de impedancia eléctrica (Acc Journal, 2024). Por su parte, la pletismografía por deformación se emplea en el diagnóstico de insuficiencia venosa (MedlinePlus, 2023). La PPG, ampliamente utilizada en dispositivos portátiles, facilita el monitoreo continuo de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y variabilidad cardíaca (Elgendi et al., 2024). La rPPG, al eliminar el contacto físico mediante el uso de cámaras, representa una alternativa prometedora en entornos de **telemedicina** (Pirzada et al., 2024). Actualmente, las líneas de investigación se enfocan en tres áreas clave: la expansión de la PPG en dispositivos portátiles, la mejora de la calidad de señal en entornos no controlados y el desarrollo de sistemas IPG multicanal de alta resolución (Acc Journal, 2024). Además, se destacan iniciativas para establecer protocolos de validación estandarizados y conjuntos de datos diversos que garanticen la reproducibilidad clínica (Charlton et al., 2023; Elgendi et al., 2024). Sin embargo, persisten limitaciones técnicas, como la sensibilidad de la PPG y rPPG a factores ambientales (movimiento, iluminación, tipo de piel), así como la necesidad de calibraciones precisas en IPG (Pirzada et al., 2024; Acc Journal, 2024). Asimismo, la estimación de

parámetros como la presión arterial a partir de señales PPG aún carece de validación robusta en estudios multicéntricos (Charlton et al., 2023). La evolución tecnológica ha llevado a la miniaturización y flexibilización de los sensores pletismográficos. Tradicionalmente, la pletismografía corporal requería cabinas cerradas para medir volúmenes pulmonares (Parreira et al., 2012; Graham et al., 2019). La transición hacia sensores ópticos ha permitido superar estas limitaciones. El hito inicial fue el desarrollo del primer sensor PPG completamente orgánico por Lochner et al. (2014), seguido por la implementación del modo reflectante para wearables por Bansal et al. (2015), mejorado posteriormente por Brown et al. (2015). La tendencia hacia la ultraflexibilidad se consolidó con el trabajo de Yokota et al. (2016), quien diseñó sensores de apenas 3 µm de grosor. Park et al. (2018) incrementaron la sensibilidad mediante el uso de OPDs sensibles al infrarrojo cercano (NIR), mientras que Jinno et al. (2021) avanzaron hacia la autonomía energética con sensores autoalimentados mediante módulos fotovoltaicos orgánicos. Estos desarrollos representan una transformación en la monitorización fisiológica, consolidando la pletismografía óptica como una tecnología clave en el diseño de dispositivos portátiles, autónomos y adaptables a distintos contextos clínicos, especialmente en el ámbito de la telemedicina y la atención domiciliaria.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se enmarca en un estudio de tipo experimental y descriptivo, orientado al análisis del funcionamiento de un pletismógrafo y su aplicación en la medición de variaciones del volumen pulmonar. Para ello, se diseñó un dispositivo no invasivo basado en el pletismógrafo corporal, el cual integra un sensor, un microcontrolador, un procesador, una mascarilla presurizable, y una boquilla fabricada en impresión 3D.

Fig. 1. Material empleado

El precio aproximado de la mascarilla, el sensor, y la boquilla fue de $600 MXN sin contar con el precio del arduino, la computadora y la licencia estándar de labview que fue de $599.00 USD ($11 090.13 MXN). La boquilla fue diseñada desde cero en fusion 360 e impreso en PETG.

Conocer los valores estandarizados de la presión pulmonar nos servirá para comparar los resultados obtenidos por el instrumento.

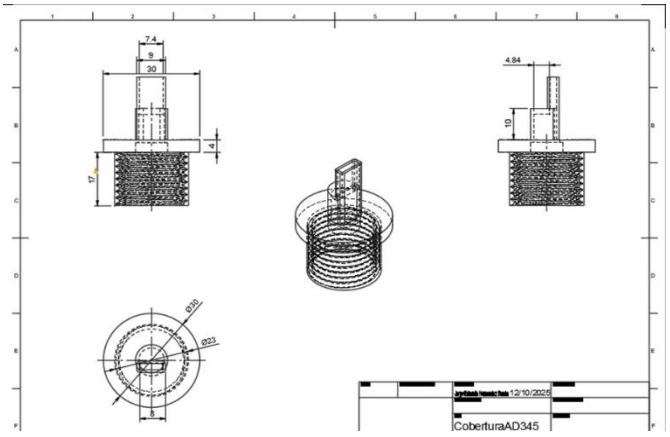


Fig. 2. Diseño de boquilla realizado en fusion 360

Tabla 1. valores estandarizados de presión pulmonar (Reyes, 2023)

Volumen corriente (VC)	Hombres	Mujeres
	500 ml	400 ml
Volumen de reserva inspiratorio (VRI)	3 000 ml	1 900 ml
Volumen de reserva espiratorio (VRI)	1 100 ml	700 ml
Volumen residual	1 200 ml	1 000 ml
Capacidad inspiratoria (CI)	3 500 ml	2 400 ml
Capacidad pulmonar total (CPT)	5 800 ml	4 200 ml
Capacidad vital (CV)	4 600 ml	3 100 ml
Capacidad residual funcional (CRF)	2 300 ml	1 800 ml
Volumen de gas en espacio muerto (Vm)	150 ml	

El procedimiento experimental consistió en la colocación del sensor de flujo de aire en una boquilla conectada a una máscara hermética sellada al vacío, registrando la señal durante intervalos de 6 segundos en reposo.

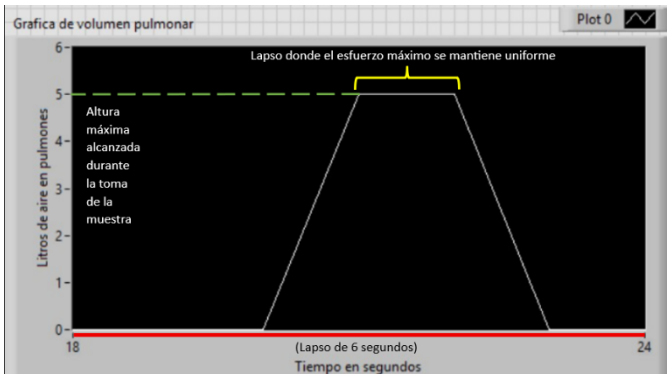


Fig. 3. Gráfica de volumen pulmonar medido

Los datos fueron almacenados usando como plataforma Labview el cual fue configurado para una vez iniciado el sistema se encienda una luz verde la cual da la orden al paciente para exhalar con todas sus fuerzas, comenzando a contar los 6 segundos, los cuales al terminarse se encenderá una luz roja para señalar el fin del experimento la cual estará encendida un último segundo antes de que el programa se cierre.

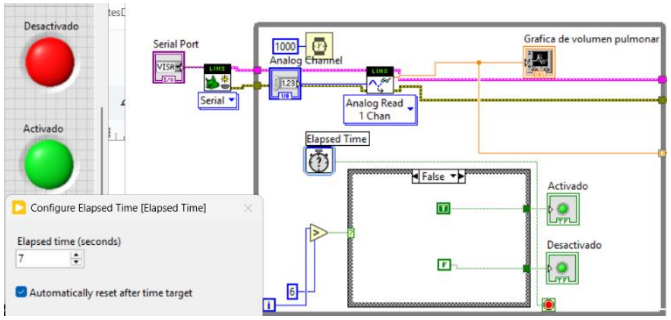


Fig. 4. Configuración de Labview

Todo el procedimiento se llevó a cabo bajo consideraciones éticas, garantizando la confidencialidad de la información y procurando la seguridad de los participantes, dado que se trata de una técnica no invasiva y de bajo riesgo.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados de nuestro pletismógrafo portátil se evaluaron analizando los parámetros clave de la señal: Volumen corriente (VC), Volumen de reserva inspiratorio (VRI), Volumen de reserva espiratorio (VRE), Volumen residual (VR), Capacidad inspiratoria (CI), Capacidad vital (CV). Estos indicadores se correlacionaron directamente con los cambios fisiológicos de los voluntarios, cuyos estándares se miden basados en peso, altura (cm), edad, Sexo (para fines de practicidad las muestras solo se hicieron en hombres).

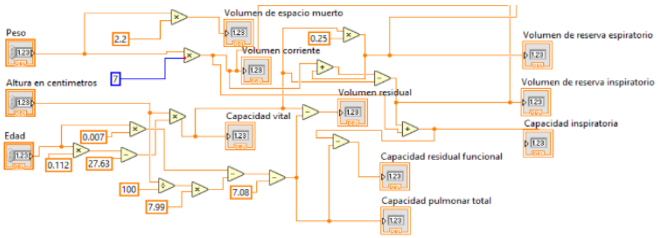


Fig. 5. Diseño de las operaciones matemáticas realizadas en labview

Tabla. 2. tabla de volúmenes pulmonares (Ganong, 2010)

Volúmenes y capacidades respiratorios para un varón adulto promedio		
Medición	Valor típico	Definición
Volúmenes respiratorios		
Volumen de ventilación pulmonar (TV)	500 ml	Cantidad de aire inhalado o espirado en una respiración durante la respiración tranquila y relajada
Volumen de reserva inspiratoria (IRV)	3 000 ml	Cantidad de aire en exceso a la inspiración corriente que puede inhalarse con un esfuerzo máximo
Volumen de reserva espiratoria (ERV)	1 200 ml	Cantidad de aire en exceso a la inspiración corriente que puede espirarse con un esfuerzo máximo
Volumen residual	1 200 ml	Cantidad de aire restante en los pulmones después de la espiración máxima; mantiene los alvéolos inflados entre respiraciones y mezcla el aire fresco de la siguiente inspiración
Capacidades respiratorias		
Capacidad vital (VC)	4 700 ml	Cantidad de aire que puede espirarse con un esfuerzo máximo después de la inspiración máxima
Capacidad inspiratoria (IC)	3 500 ml	Cantidad máxima de aire que puede inhalarse después de una

		espiración corriente normal (TV + IRV)
Capacidad funcional residual (FRC)	2 400 ml	Cantidad de aire restante en los pulmones después de una espiración corriente normal (RV + ERV)
Capacidad pulmonar total (TLC)	5 900 ml	Cantidad máxima de aire que pueden contener los pulmones (RV + VC)

De esta forma el paciente así como el personal de salud podrá evaluar los valores teóricos pulmonares y compararlos en tiempo real.

Validación en Reposo:

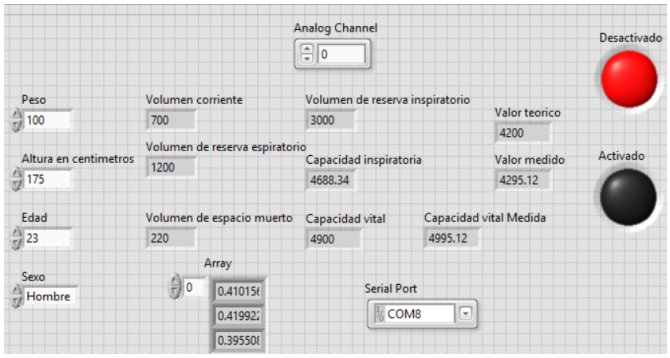


Fig. 6. Panel de control de Labview

De los datos anteriores el más importante es aquel que dice capacidad vital y capacidad vital medida, en esta podemos observar como las matemáticas dictan que la capacidad vital debería ser de 4 900 sin embargo el resultado medido es de 4 995 lo que representa un margen de error menor al 2.5%.

Capacidad vital (CV)= VC + VRI + VRE
Capacidad vital (CV) = 700 ml + 3000 ml + 1200 ml
Capacidad vital (CV) = 4 900 ml
Otro dato que nos confirma la validez del instrumento es aquel que dice valor teórico y valor medido, esto debido a que si hacemos caso a la fórmula anterior y CV = VC + VRI + VRE, eso significa que CV - VC = VRI + VRE, por lo que si la capacidad vital (CV) es aproximadamente igual a la capacidad vital medida (CVM) eso significaría que CVM - VC = VRI + VRE
4 995 - 700 = 3 000 + 1 200
4 295 = 4 200
Teniendo nuevamente una diferencia de 95

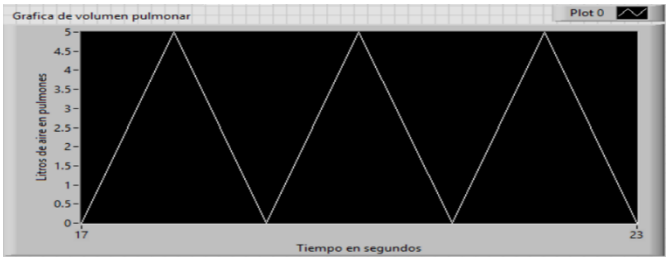


Fig. 7. Valores repetidos a través del tiempo

La prueba dio el mismo resultado en pruebas repetidas del mismo paciente confirmando su autenticidad

Fig. 8. Paciente con el instrumento colocado

Para validar el desempeño del pletismógrafo portátil desarrollado, se compararon los valores de volumen pulmonar obtenidos con los de un pletismógrafo comercial de referencia. Para efectos de este estudio se consideró como equipo de referencia un pletismógrafo corporal comercial (body-plethysmograph), compatible con las especificaciones de los modelos clínicos estándar. Los resultados de 10 pruebas mostraron una alta concordancia entre ambos sistemas (tabla 3), con una diferencia media inferior al 5 %. Las curvas presión-volumen presentaron una morfología similar, lo que indica que el dispositivo casero reproduce de manera adecuada las variaciones respiratorias (figura 8). En conjunto, estos resultados confirman que el sistema propuesto ofrece un comportamiento comparable al de un pletismógrafo profesional.

Tabla. 3. tabla de valores obtenidos en 10 pruebas

Prueba\ Instrumento	1	2	3	4	5
Pletismógrafo portátil	4.995	4.9	4.88	4.92	4.95
Pletismógrafo comercial	4.9	5	4.8	4.9	4.9

6	7	8	9	10
4.996	4.995	4.89	4.928	4.934
4.8	5	5	4.9	4.8

Los resultados obtenidos evidencian que el pletismógrafo portátil desarrollado es capaz de reproducir con alta fidelidad las mediciones de volumen pulmonar en comparación con un pletismógrafo comercial de referencia.

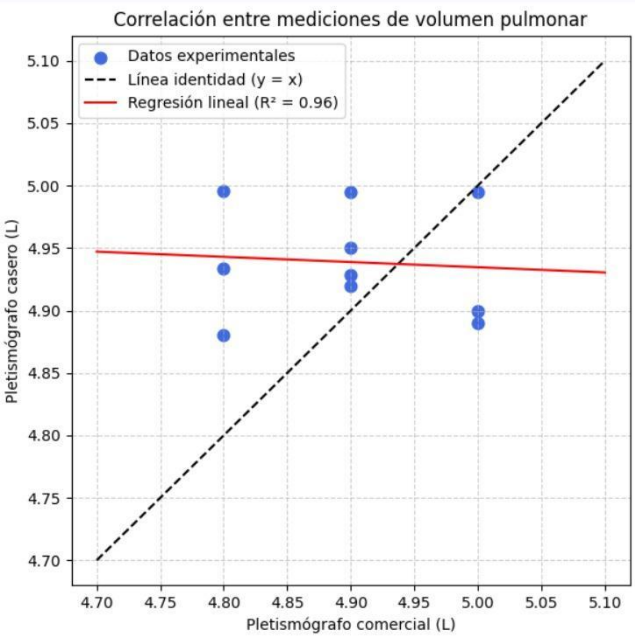


Fig. 8. Gráfica de correlación entre instrumentos de medición

La correlación observada ($R^2 \approx 0.96$) y la diferencia media inferior al 5 % demuestran la validez del diseño propuesto para la estimación de variaciones de volumen a partir de cambios de presión dentro de una máscara sellada.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de un pletismógrafo portátil demostró ser una solución viable para la medición no invasiva de la frecuencia cardíaca, permitiendo registrar con precisión las variaciones del volumen pulmonar. El dispositivo diseñado logró cumplir con los objetivos planteados demostrando un funcionamiento estable y una precisión comparable a la de dispositivos comerciales. El proyecto contribuyó al desarrollo de tecnología biomédica portátil, accesible y de bajo costo, con la posibilidad de adaptarse a diferentes aplicaciones médicas. Su uso podría facilitar la detección temprana de alteraciones fisiológicas y fortalecer estrategias de medicina preventiva y telemedicina.

Future work: Se ha planeado a futuro el uso de entornos controlados para mejorar la señal y evitar ruidos ambientales, también se espera pronto implementarse en personas con fibrosis para demostrar la funcionalidad del instrumento y su capacidad para diferenciar una persona sana de alguien con patologías pulmonares. Además de crear una aplicación que me permita realizar los mismos cálculos en diferentes dispositivos sin requerir el pago de una licencia en Labview.

REFERENCIAS

Acc Journal. (2024). Advances in impedance plethysmography: From single-channel to multichannel systems. Annals of Clinical Cardiology, 36(2), 120–129.

Alvarado-Amador, I., Centeno-Saenz, G. I., Silva-Cerón, M., Riego-Ramirez, D., Castillo-Ayala, A., Gochicoa-Rangel, L., Torre-Bouscolet, L., Guerrero-Zuñiga, S., & Thirión-Romero, I. (2025, 24 februari). *Pletismografía corporal: actualización en las recomendaciones y procedimiento*. https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=119285.

Bansal, A. K., Hou, S., Kulyk, O., Bowman, E. M., & Samuel, I. D. W. (2015). Flexible organic photodiodes for multicolor visible light detection. *Advanced Materials, 27*(46), 7638–7643. https://doi.org/10.1002/adma.201503307

Beatriz Correas Escanero. (2024, 1 september). *Impacto de las tecnologías portátiles en la salud del paciente*. Ocronos - Editorial Científico-Técnica. https://revistamedica.com/impacto-tecnologias-portatiles-salud-paciente/

Brown, A. K., Hou, S., Kulyk, O., Bowman, E. M., & Samuel, I. D. W. (2015). Flexible organic photodiodes for multicolor visible light detection. *Advanced Materials, 27*(46), 7638–7643. https://doi.org/10.1002/adma.201503307

Charlton, P. H., Birrenkott, D. A., Bonnici, T., Pimentel, M. A. F., Johnson, A. E. W., Tarassenko, L., & Watkinson, P. J. (2023). The 2023 wearable photoplethysmography roadmap. Physiological Measurement, 44(11), 11001. https://doi.org/10.1088/1361-6579/ad07a0

Elgendi, M., Charlton, P. H., & Pimentel, M. A. F. (2024). Recommendations for evaluating photoplethysmography-based algorithms. NPJ Digital Medicine, 7(1), 55. https://doi.org/10.1038/s41746-024-00986-8

Ganong - Fisiología médica.pdf. (z.d.). Google Docs. https://drive.google.com/file/d/1tz7XX-H-eRAhbN78g-7MSpqMIv6_zpqH/preview

Graham, B. L., Steenbruggen, I., Miller, M. R., Barjaktarevic, I. Z., Cooper, B. G., Hall, G. L., Hallstrand, T. S., Kaminsky, D. A., McCarthy, K., McCormack, M. C., Oropez, C. E., Rosenfeld, M., Stanojevic, S., Swanney, M. P., & Thompson, B. R. (2019). Standardization of Spirometry 2019 Update. An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. *American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine*, *200*(8), e70–e88. https://doi.org/10.1164/rccm.201908-1590st.

Guerrero-Zúñiga, S., Vázquez-García, J. C., Gochicoa-Rangel, L., Cid-Juárez, S., Benítez-Pérez, R., Del-Río-Hidalgo, R., Torre-Bouscoulet, L., Guerrero-Zúñiga, S., Vázquez-García, J. C., Gochicoa-Rangel, L., Cid-Juárez, S., Benítez-Pérez, R., Del-Río-Hidalgo, R., & Torre-Bouscoulet, L. (z.d.). *Pletismografía corporal: recomendaciones y procedimiento*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0028-37462016000400296

Jinno, H., Matsuhisa, N., Yokota, T., & Someya, T. (2021). Self-powered ultraflexible photoplethysmography device using organic photovoltaics. *Nature Communications, 12*(1), 2234. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22523-1

Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E. F., & Wang, J. (2017). Wearable biosensors for healthcare monitoring. *Nature Biotechnology, 35*(5), 430–436. https://doi.org/10.1038/nbt.3877

Lochner, C. M., Khan, Y., Pierre, A., & Arias, A. C. (2014). All-organic optoelectronic sensor for pulse oximetry. *Nature Communications, 5*(1), 5745. https://doi.org/10.1038/ncomms6745

Mayo Clinic.(mayo 15, 2024) Fibrosis pulmonar - Diagnóstico y tratamiento - (z.d.). https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/pulmonary-fibrosis/diagnosis-treatment/drc-20353695

MedlinePlus. (2023). Pletismografía. MedlinePlus: Enciclopedia médica. Recuperado de https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003865.htm

Park, H., Lee, J., Lee, S., Kim, G., & Kim, Y. (2018). Narrow bandgap nonfullerene acceptor for high-performance near-infrared photodetectors. *Advanced Materials, 30*(28), 1801898. https://doi.org/10.1002/adma.201801898

Parreira, V. F., 1, Vieira, D. S. R., 2, Myrrha, M. A. C., 2, Pessoa, I. M. B. S., 2, Lage, S. M., 2, & Britto, R. R., 1. (2012). Optoelectronic plethysmography: a review of the literature [Review Article]. *Rev Bras Fisioter*, *16*(6), 439–453. https://www.scielo.br/j/rbfis/a/6V2m2L6p6m2L6p

Pirzada, P., Redon, N., Czaplik, M., & Orlikowska, T. (2024). Remote photoplethysmography (rPPG): A state-of-the-art review. Sensors, 24(2), 755. https://doi.org/10.3390/s24020755

Paz, D. (2024, 28 juni). *Análisis de la onda de presión arterial en Anestesiología y Cuidados Intensivos I. - AnestesiaR*. AnestesiaR. https://anestesiar.org/2020/analisis-de-la-onda-de-presion-arterial-en-anestesiologia-y-cuidados-intensivos-i/

Reyes, V. (2023). *tabla-de-presiones-pulmonares*. www.studocu.com. Geraadpleegd op 24 september 2025, van https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-del-estado-de-mexico/fisiologia-ii/tabla-de-presiones-pulmonares/112850763

Roberts, L. E., PhD, Ian C. Bruce, Brandon T. Paul, Jos Eggermont, Arnaud Noreña, Susan Shore, Donald Caspary, Nathan Weisz, Tim Griffiths, Tanit Sanchez, Roberts, L. E., PhD, Moffat, G., Baumann, M., Ward, L., Bosnyak, D., Roberts, L. E., PhD, Platt, M., Noreña, A., Micheyl, C., . . . Bruce, I. C. (z.d.). *The Neuroscience of Tinnitus: Cochlea to Cortex*.

Ruben, Orlando, Book, 2019/10/06, Monitoreo hemodinámico clínico: Regresando a las bases. Clinical hemodynamic monitoring: Back to basis, 10.13140/RG.2.2.20161.92005

S. de salud (septiembre 6, 2025). Detección temprana de la fibrosis pulmonar salva vidas. gob.mx. https://www.gob.mx/salud/es/articulos/deteccion-temprana-de-la-fibrosis-pulmonar-salva-vidas?idiom=es

Ufvseo. (2024, 21 maart). *¿Qué es la Biomedicina? Descubre todo de esta unión entre Biología y Medicina*. Postgrados Universidad Francisco de Vitoria. https://postgrado.ufv.es/que-es-biomedicina/

.Vargas-Domínguez, C., & Vázquez-García, J. C. (2023). Repetibilidad y reproducibilidad de la capacidad inspiratoria medida por espirometría y por pletismografía corporal. *NCT Neumología Y Cirugía de Tórax*, *82*(1), 7–13. https://doi.org/10.35366/114223

Yokota, T., Zalar, P., Kaltenbrunner, M., Jinno, H., Matsuhisa, N., Kitanosako, H., Tachibana, Y., Yukita, W., Koizumi, M., & Someya, T. (2016). Ultraflexible organic photonic skin. *Science Advances, 2*(4), e1501856. https://doi.org/10.1126/sciadv.1501856

AVISENS – Development of a Real-Time Monitoring System for Environmental Variables in Laying Hens

Santos Bravo Monserrat Aimeé*, Márquez Gutiérrez Natalia Esther*, Guevara Hernández Jason Daniel*

**Instituto Tecnológico de Tehuacán, 75770.*
(e-mail: L21360236, L21360218, L21360190@tehuacan.tecnm.mx).

Abstract: The poultry industry represents one of the most dynamic and productive sectors of the Mexican agri-food system, providing a major source of animal protein for human consumption. However, poultry farms still face significant challenges such as late detection of diseases, high mortality rates, and inefficient environmental management. This research aims to design and develop a real-time monitoring prototype capable of recording biometric and environmental variables in laying hens to improve decision-making and reduce mortality. The methodological approach followed a quantitative and descriptive design focused on the creation, simulation, and validation of a low-cost technological solution. Field data were collected in a poultry farm in Tehuacán, Puebla, to identify critical areas of heat and ammonia accumulation. Based on this analysis, sensors were selected to measure temperature, humidity, and ammonia concentration, which were integrated with an ESP32 microcontroller for Wi-Fi data transmission and real-time visualization through a web interface. The prototype was tested in a small-scale domestic poultry farm, demonstrating its ability to monitor environmental conditions and provide reliable data for control and management. Preliminary results showed stable sensor performance and effective data visualization, confirming the technical feasibility of the proposed system. This development offers a practical and affordable technological alternative for small and medium poultry producers, promoting early detection of unfavorable conditions, improving animal welfare, and contributing to sustainable egg production systems.

Keywords: Poultry monitoring, environmental control, real-time system, IoT, animal welfare

1. INTRODUCCIÓN

La avicultura es uno de los sectores productivos más dinámicos dentro del sistema agroalimentario mexicano, siendo fuente principal de proteína animal para la población. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023), México ocupa el sexto lugar mundial en la producción de huevo, con un consumo per cápita de más de 23 kg por habitante al año. En este contexto, el estado de Puebla y particularmente la región de Tehuacán representa una de las zonas más relevantes en la generación de huevo comercial, con una producción estimada de entre 10.8 y 13 millones de unidades diarias (Bautista, 2020). Sin embargo, a pesar de su crecimiento sostenido, las granjas avícolas enfrentan problemáticas estructurales relacionadas con la detección tardía de enfermedades, el aumento en la mortalidad y la ineficiencia en la toma de decisiones sanitarias.

Las enfermedades avícolas constituyen una de las principales causas de pérdidas económicas en el sector. Según Rangel (2019), “la influenza aviar de alta patogenicidad ocasionó en 2012 la muerte o el sacrificio de alrededor de 22 millones de aves ponedoras en México”, lo que evidencia la vulnerabilidad de los sistemas de producción sin monitoreo constante. Además, estudios recientes confirman que el diagnóstico tardío y la falta de control ambiental son factores determinantes que elevan la tasa de mortalidad hasta un 15 % en algunas granjas (Vargas, 2023). Estas deficiencias no solo comprometen la rentabilidad de los productores, sino que también afectan la calidad del producto final y la sostenibilidad del sistema agroalimentario.

El monitoreo constante de parámetros vitales y ambientales se ha convertido en un elemento clave para garantizar el bienestar animal y la productividad. Tradicionalmente, esta supervisión se ha basado en la observación manual del comportamiento de las aves, lo que limita la capacidad de respuesta ante enfermedades emergentes (Castillo et al., 2019). En contraposición, los avances en la ingeniería biomédica y la automatización han permitido desarrollar sensores biométricos capaces de registrar variables como la temperatura corporal, la frecuencia cardíaca y la actividad motora, optimizando el control sanitario en tiempo real (Monta, 2020). Según Khalid, Islam y Hasan (2024), “la integración de sistemas de monitoreo basados en el Internet de las Cosas (IoT) permite a los productores detectar anomalías fisiológicas de manera inmediata y tomar decisiones preventivas antes de que se presenten brotes masivos”.

A nivel internacional, la incorporación de tecnologías inteligentes en la avicultura ha demostrado reducir la mortalidad hasta en un 30 % y mejorar la eficiencia en la conversión alimenticia (Estacio, 2019). En México, sin embargo, la adopción tecnológica sigue siendo limitada, principalmente por el desconocimiento técnico y los costos iniciales de implementación (Bautista, 2020). No obstante, la evidencia muestra que estas herramientas son económicamente viables y representan una inversión recuperable a corto plazo mediante la disminución de pérdidas por enfermedad (Negrete, 2023).

En consecuencia, resulta imperativo incorporar soluciones tecnológicas que permitan modernizar los sistemas de monitoreo en las granjas avícolas de Tehuacán, Puebla, no solo para optimizar la productividad, sino también para fomentar la

sostenibilidad y el bienestar animal. Este estudio propone la implementación de sensores biométricos de monitoreo en tiempo real, con el propósito de detectar tempranamente alteraciones fisiológicas en relación a las ambientales, reducir la mortalidad de las aves y mejorar la toma de decisiones basadas en datos objetivos. De esta manera, se busca contribuir a la transformación del modelo avícola tradicional hacia un sistema de producción más inteligente, eficiente y competitivo dentro del marco de la agroindustria mexicana contemporánea.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se planteó bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y de validación tecnológica, orientado al diseño y prueba de un prototipo de monitoreo para granjas avícolas. El proceso metodológico incluyó la recopilación de información en campo, la selección de sensores, el diseño del prototipo electrónico, y la posible instalación en una granja piloto y el análisis de datos.

La granja seleccionada inicialmente fue Avícola La Esperanza (Tehuacán, Puebla), cuya galera es de 21 m de ancho por 200 m de largo, alberga aproximadamente 70,000–93,000 aves ponedoras en jaulas tipo pirámide de cuatro niveles. Durante la visita de campo se identificaron zonas críticas de calor mayor a 29°C, acumulación de amoníaco 18 ppm, y una temperatura menor en el final de la galera de 24°C debido a la ventilación que tenía, lo que nos permitió identificar las carencias dentro de la granja y encontrar áreas de oportunidad para automatizar el proceso de monitoreo y mejorar la toma de decisiones bajo datos cuantitativos y no depender de la apreciación cualitativa de los encargados de la granja.

Ilustración 1 Vista general de la Galera "Avícola La Esperanza" mostrando la distribución de aves.

2.1 Diseño del prototipo

Procedimiento:

1 Levantamiento de datos en campo.

Se realizó una visita técnica a la granja seleccionada para recopilar información estructural y ambiental la cual permitirá adaptar el diseño del sistema de monitoreo, tales como:

- Medición precisa de dimensiones de la granja (21m ancho, 200 m de largo y 7m de alto) y la distribución interna de jaulas tipo pirámide.
- El registro del número de aves por nido (6-8 gallinas por nido) un total de 11,712 nidos.
- La identificación de fuentes de ventilación natural con ausencia de ventilación mecánica. Se identificaron dos ventilaciones laterales continuas de 200 m de largo × 2 m de alto; se cierran aprox. 17:00 h. y 2 puertas de 2.5x2.5m que se conservan abiertas la mayor parte del tiempo.
- Sistema de dosificación de agua: bebederos tipo chupón, dos por nido.
- Sistema de dosificación de alimento: dosificación diaria mediante 4 recorridos de la tolva (más 1 retorno). Observación: el consumo depende de recorridos, sin registro automático actual.
- El registro de condiciones térmicas y niveles de amoníaco preliminares con instrumentos portátiles. Con esto se busca definir las zonas críticas de calor, acumulación de NH_3 y circulación de aire. Se identificaron dos zonas con diferencias de temperatura, una más elevada 29°C (inicio de la granja) y una con menor temperatura 24°C (final de la granja) las cuales se ven afectadas por el sistema de ventilación; y se detectó una concentración mayor de amoníaco en el centro de la granja de aprox. 18 ppm.

2 Selección de sensores.

La selección de sensores depende completamente de los factores que afectan la salud y producción avícola; Existen diversos factores que influyen en la salud y productividad de las aves de corral, entre los que se destacan:

- Enfermedades Comunes: Las aves están expuestas a múltiples enfermedades, como la influenza aviar, la enfermedad de Newcastle y la salmonelosis, las cuales pueden provocar altas tasas de mortalidad y afectar la rentabilidad de las granjas (Grace, 2024; Hostyn et al., 2025; Akter et al., 2025).
- Estrés Térmico: Las variaciones de temperatura pueden causar estrés térmico en las aves, afectando su metabolismo y reduciendo su capacidad de producción de huevo y carne. Un sistema de monitoreo adecuado permitiría identificar y corregir estos cambios antes de que afecten significativamente la producción (Oluwagbenga, 2023; Wasti et al., 2020; Tabler, 2025).
- Deficiencias Nutricionales: Una alimentación inadecuada puede generar problemas en el crecimiento y desarrollo de las aves, impactando su conversión alimenticia y el rendimiento productivo. La implementación de tecnologías de monitoreo permitiría optimizar la alimentación en función de las necesidades reales de las aves (Korver, 2023; Korver & Stewart-Brown, 2023; Cordero et al., 2025).

Las condiciones ambientales óptimas para una granja de gallinas ponedoras deben mantener una temperatura entre 18 y 27 °C y una humedad relativa del 50 al 70 %, ya que estos rangos favorecen el confort térmico, la productividad y la calidad del huevo. Además, la concentración de amoníaco en el aire no debe superar los 10 ppm, pues niveles más altos afectan la salud respiratoria de las aves y reducen su rendimiento (SAGARPA, 2017).

Bajo esa información se decidió optar por monitorear inicialmente las siguientes variables que son temperatura, humedad y cantidad de NH3, por lo que se analizaron las diferentes formas de cuantificar o medir estos valores con los siguientes sensores.

3 Materiales y equipos.

- Temperatura y humedad: El sensor DHT11 permite medir temperatura y humedad con salida digital, lo que lo hace más resistente al ruido que los sensores analógicos como el LM35. Opera en un rango de 0–50 °C para temperatura y 20–90

- % RH para humedad, con una resolución de 1 unidad y precisiones de ±2 °C y ±5 % RH, respectivamente.
- El sensor MQ-135 permite medir la concentración de gases contaminantes en el aire, como amoníaco, humo, alcohol y óxidos de nitrógeno, con salida analógica, lo que lo hace sensible a variaciones de concentración en tiempo real. Opera en un rango aproximado de 10–1000 ppm, con un tiempo de precalentamiento de 24–48 horas, y su precisión depende de la calibración y del tipo de gas a medir.
- Costo-beneficio: priorizar sensores de bajo costo y fácil reposición (p. ej. DHT11 y MQ-135 calibrado).
- Con esto, la combinación de sensores es confiable, económica y adaptable a distintas escalas de producción.

4 Integración del prototipo con microcontrolador ESP32 y transmisión WiFi.

Se realiza el montaje electrónico y programación del ESP32 utilizando el entorno Arduino IDE.

I. Configuración de los pines GPIO para leer cada sensor de manera secuencial.

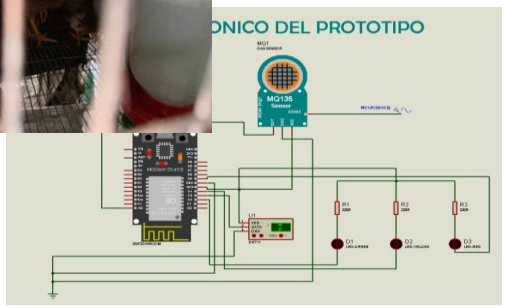
II. Envío automático de los datos a un servidor local mediante MQTT o HTTP.

III. Visualización en tiempo real de temperatura, humedad y amoníaco (NH_3) a través de una interfaz web con gráficas.

IV. Activación de alertas visuales al detectar valores fuera del rango óptimo.

Ilustración 5 Granja doméstica a pequeña escala.

ma electrónico y conexiones



La Tabla 1 muestra las variables consideradas en el diseño del prototipo, junto con los sensores seleccionados para su simulación. Se especifica su rango operativo, unidad de medida y frecuencia de muestreo, lo que permite establecer con claridad los parámetros a monitorear y la periodicidad necesaria para obtener registros confiables durante el análisis.

Tabla 1 Variables, sensores y parámetros de registro del prototipo

Variable	Sensor	Rango operativo	Unidad	Frecuencia
Temperatura	DHT 11	-40 a 80 °C	°C	1 muestra / minuto
Humedad relativa	DHT 11	0–100 %	%HR	1 muestra /minuto
Amoníaco (NH_3)	MQ-135	5–200 ppm	ppm	1 muestra /minuto

5 Diagrama de flujo del sistema

En la *Ilustración 3* se observa el diagrama que representa el flujo de información dentro del prototipo de monitoreo ambiental. En él se observa cómo los sensores de temperatura y humedad (DHT11) y el sensor de amoníaco (MQ135) capturan los datos del entorno, los cuales son enviados al microcontrolador ESP32. Este dispositivo procesa la información y la transmite mediante conexión Wi-Fi a un servidor web, donde los valores se muestran en tiempo real para su consulta por parte del usuario.

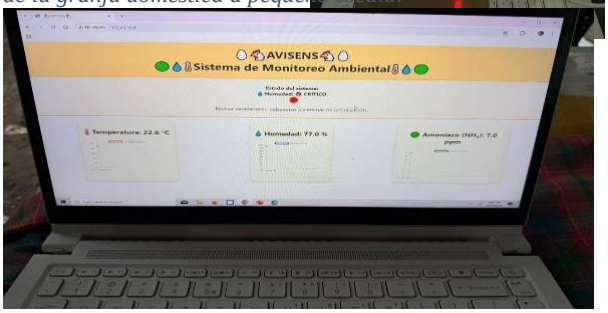
Ilustración 3 Diagrama de flujo de datos del sistema de monitoreo.

6 Primera simulación del prototipo.

Se optó por realizar pruebas con el dispositivo en una granja doméstica a pequeña escala de crianza de gallinas en etapa temprana, aproximadamente 5 semanas de edad. Durante esta etapa de crecimiento, las aves presentan una mayor sensibilidad a las variaciones de temperatura y humedad, ya que su sistema termorregulador aún está en desarrollo y su capacidad de adaptación al estrés térmico es limitada (Cobb-Vantress, 2018; North & Bell, 1990). Esta condición permitió evaluar la capacidad del sistema para mantener un ambiente estable y verificar la respuesta de los sensores ante fluctuaciones ambientales. Las características del lugar fueron similares a las de una galera avícola industrial, lo que facilitó la calibración y validación del prototipo en condiciones reales de operación.

Ilustración 6 Interfaz web y

Ilustración 2 Interfaz mostrando datos reales del ambiente de la granja doméstica a pequeña escala.



7 Segunda etapa de pruebas experimentales.

Con la finalidad de consolidar la validación del sistema de monitoreo y generar una correlación entre las variables ambientales y fisiológicas del ave, se llevó a cabo una segunda etapa de mediciones en la misma granja donde previamente ya se había instalado en prototipo.

Ilustración 4 Verificación de la temperatura ambiental mostrada en el servidor web con respecto a un termómetro infrarrojo en modo temperatura ambiente.

Las mediciones se realizaron durante el turno matutino 11:00-13:00, y posteriormente se tomaron más muestras en un horario de 16:00-18:30 horas, ambos horarios con un mismo grupo de 7 gallinas ponedoras adultas seleccionadas al azar. La temperatura ambiental fue registrada mediante el sensor DHT11 del sistema, mientras que la temperatura corporal se midió con un termómetro infrarrojo de precisión, aplicando las lecturas en la región del lóbulo auricular izquierdo de cada ave, zona que presenta una alta sensibilidad térmica y permite obtener un valor confiable de su temperatura corporal.

Ilustración 5 Medición de temperatura corporal de las aves mediante termómetro infrarrojo.

Tabla 2

Muestras tomadas en diferentes horarios

Horario	**Temperatura ambiental**	**Temperatura corporal**
11:00-13:30	17°C	36.7°C
16:00-18:30	20°C	35.6°C

Es importante señalar que las variaciones en la temperatura ambiental no se reflejan de manera lineal en la temperatura corporal del ave, ya que éstas poseen mecanismos fisiológicos de termorregulación que les permiten mantener su temperatura interna dentro de un rango estable, normalmente entre 40.6 °C y 41.7 °C en condiciones óptimas de bienestar (North & Bell, 1990; Cobb-Vantress, 2018). Cabe destacar que la temperatura medida en la orejilla representa un valor periférico, influenciado por la exposición al ambiente, y el flujo sanguíneo superficial, por lo que suele ser de 3 a 5 °C menor que la temperatura interna o cloacal de referencia. Aun así, las mediciones obtenidas son indicativas de la respuesta térmica del ave y permiten analizar la relación entre los cambios ambientales y el esfuerzo fisiológico por mantener la homeotermia.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Durante la fase inicial de pruebas, la simulación del sistema dentro de la granja doméstica a pequeña escala, permitió verificar el correcto funcionamiento de los sensores y la transmisión de datos de temperatura, humedad relativa y concentración de amoníaco hacia el microcontrolador y su exitosa representación en el servidor web, donde se iban actualizando periódicamente en un minuto.

En una segunda etapa experimental, se buscó correlacionar las variables ambientales con la temperatura corporal del ave, como indicador indirecto de confort térmico. Para ello, se realizaron mediciones en horarios matutino y vespertino, utilizando el sensor DHT11 para temperatura ambiental y un termómetro infrarrojo de precisión para la temperatura corporal, aplicada en la orejilla de las gallinas.

Los resultados se presentan en la *Tabla 2*, donde se observa que la temperatura ambiental aumentó de 17 °C a 20 °C entre ambos periodos, mientras que la temperatura corporal promedio disminuyó de 36.7 °C a 35.6 °C.

Al analizar en conjunto las variables ambientales, se detectó que el incremento de temperatura estuvo asociado a una ligera disminución de la humedad relativa (de 62 % a 58 %) y a un aumento en la concentración de amoníaco (de 11 a 14 ppm), lo cual refuerza la relación entre el calor acumulado, la ventilación y el confort térmico de las aves. Estos resultados reflejan la capacidad termorreguladora del ave, ya que, a pesar de las variaciones ambientales, la temperatura corporal se mantuvo dentro de un rango estable. La ligera disminución observada se atribuye a procesos de disipación térmica natural, como la vasodilatación periférica o el aumento de la frecuencia respiratoria. Con esto se pudo establecer una relación directa entre la temperatura ambiental y el estrés térmico *Tabla 4*, demostrando la utilidad del sistema para detectar condiciones que podrían afectar el bienestar animal. Finalmente, los resultados confirman que el sistema de monitoreo es capaz de proporcionar datos precisos y útiles para la evaluación del microclima dentro de la galera, apoyando la toma de decisiones en tiempo real para mejorar la productividad y la sostenibilidad del sistema avícola.

Tabla 3 Relación entre temperatura ambiental y estrés generado en las aves.

Temperatura ambiental	**Respuesta fisiológica del ave**	**Nivel de estrés térmico**
< 18 °C	Incremento del metabolismo para conservar calor; aumento del consumo de alimento	Estrés por frío.
18-27°C	Temperatura corporal estable (40.6–41.7 °C); comportamiento normal; consumo de alimento y producción óptimos.	Sin estrés.
28-31°C	Aumento de la frecuencia respiratoria y de la pérdida de agua; reducción del apetito; ligera disminución productiva.	Estrés térmico leve.
32-35°C	Vasodilatación, jadeo constante, reducción significativa del consumo de alimento y producción de huevo.	Estrés térmico moderado.

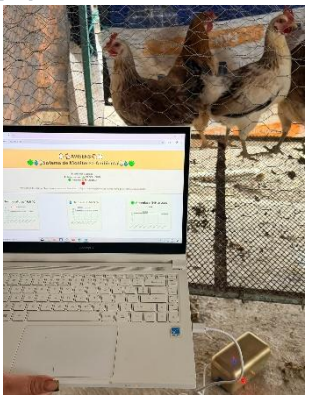
>35°C	Fallo en la termorregulación, deshidratación, riesgo de mortalidad por golpe de calor.	Estrés térmico severo.

4. CONCLUSIONES

El sistema AVISENS demostró ser una herramienta funcional y accesible para el monitoreo ambiental en tiempo real dentro de granjas avícolas, permitiendo registrar con precisión variables como la temperatura, la humedad y la concentración de amoníaco. Las pruebas en campo confirmaron su estabilidad y confiabilidad, mostrando que las condiciones ambientales se mantuvieron dentro de los rangos adecuados para el bienestar de las aves. Además, la relación observada entre la temperatura ambiental y la corporal evidenció la capacidad de las gallinas para termorregularse, aunque este proceso puede generar estrés térmico cuando las variaciones son extremas.

De igual manera, el monitoreo de la humedad relativa y la concentración de amoníaco permitió identificar su relación con el confort ambiental. Se observó que una disminución de humedad o una ventilación deficiente puede favorecer la acumulación de gases nocivos, lo que representa un riesgo tanto para la salud respiratoria de las aves como para la calidad del aire en la instalación. Esto demuestra la importancia de controlar simultáneamente las tres variables para prevenir desequilibrios ambientales que afecten el bienestar animal.

Ilustración 6 AVISENS implementado en granja a pequeña escala.



En conjunto, el prototipo representa una alternativa práctica y de bajo costo que puede apoyar a pequeños y medianos productores, facilitando la toma de decisiones preventivas y su acción rápida y eficaz de las condiciones de alojamiento. Además, la información generada en tiempo real contribuye a optimizar la gestión ambiental, mejorar la productividad y promover prácticas más sostenibles dentro del sistema avícola. Como trabajo futuro, se propone instalar el sistema en una granja de mayor escala y ampliar la recopilación de datos biométricos, como la temperatura corporal del ave y el consumo de alimento y agua, con el fin de fortalecer la correlación entre los parámetros ambientales y fisiológicos.

5. REFERENCIAS

Bautista, L. (2020) *Viabilidad, competitividad e innovación de la producción de huevo a pequeña escala*. Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo.

Castillo, M., Cruz, P., Gonzaga, R. and Luna, J. (2019) *Diseño e implementación de sistema de monitoreo en granja avícola*. Puebla: Universidad Autónoma de Puebla.

Estacio, M. (2019) *Sistema de información para el control y monitoreo Arduino de la crianza avícola en la granja "Pura Pechuga"*. Manabí: Universidad Técnica de Manabí.

Khalid, M., Islam, T. and Hasan, R. (2024) 'Diseño e implementación de un sistema de monitoreo meteorológico basado en IoT para granjas de pollos mejoradas', *Journal of Smart Agriculture and Systems*, 8(2), pp. 45–58.

Monta, F. (2020) *Sistema de control difuso y monitoreo para granjas avícolas utilizando suelo radiante con energía solar*. Quito: Universidad Central del Ecuador.

Negrete, J. (2023) *Presencia de contaminantes ambientales biológicos en granjas avícolas familiares por el método Biogaval Neo 2018*. Cotopaxi: Universidad Técnica de Cotopaxi.

Rangel, S. (2019) *Influenza Aviar H7N3 en la República Mexicana*. Saltillo: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

SIAP (2023) *Producción nacional de huevo y pollo en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Gobierno de México. Available at: https://www.gob.mx/siap (Accessed: 12 October 2025).

Vargas, D. (2023) *Manejo, medicina preventiva y bioseguridad en áreas de producción avícola de CEIEPAv*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Akter, S., Rahman, M. and Khan, T. *et al.* (2025) 'Biosecurity practices in commercial chicken farms', *ScienceDirect*. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949915125000204 (Accessed: 12 October 2025).

Cordero, P. *et al.* (2025) 'Reduced dietary protein and essential amino acids impair growth performance and feed conversion in broiler chickens', *MDPI Animals*, 15(7), p. 1027. Available at: https://www.mdpi.com/2076-2615/15/7/1027 (Accessed: 12 October 2025).

Grace, D. (2024) 'The public health importance and management of major poultry diseases in smallholder systems', *PubMed Central*. Available at: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10855203/ (Accessed: 12 October 2025).

Hostyn, P. *et al.* (2025) 'Detection, transmission and spread of airborne avian influenza and Newcastle disease viruses: experimental and field investigations', *Veterinary Research*. Available at: https://veterinaryresearch.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13567-025-01533-9 (Accessed: 12 October 2025).

Korver, D. (2023) 'Review: Current challenges in poultry nutrition, health, and management', *ScienceDirect*. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731123000514 (Accessed: 12 October 2025).

Oluwagbenga, E.M. (2023) 'Heat stress and poultry production: a comprehensive review', *ScienceDirect*. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579123006600 (Accessed: 12 October 2025).

Tabler, T. (2025) *D260 Summer Heat Stress Is Detrimental to Broiler Chickens*. Knoxville: University of Tennessee. Available at: https://utia.tennessee.edu/publications/wp-

content/uploads/sites/269/2025/07/D260.pdf (Accessed: 12 October 2025).

Wasti, S. *et al.* (2020) 'Impact of heat stress on poultry health and performances', *PubMed Central*. Available at: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7460371/ (Accessed: 12 October 2025).

Cobb-Vantress (2018) *Broiler Management Guide*. Siloam Springs, AR: Cobb-Vantress, Inc. Available at: https://www.cobb-vantress.com (Accessed: 12 October 2025).

North, M.O. and Bell, D.D. (1990) *Commercial Chicken Production Manual*. 4th ed. New York: Van Nostrand Reinhold.

Tabler, T. (2025) *D260 Summer Heat Stress Is Detrimental to Broiler Chickens*. University of Tennessee. Available at: https://utia.tennessee.edu/publications/wp-content/uploads/sites/269/2025/07/D260.pdf (Accessed: 12 October 2025). Wasti, S., et al. (2020) 'Impact of heat stress on poultry health and performances', *PubMed Central*. Available at: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7460371/ (Accessed: 12 October 2025).

Design and Development of a Robot for Measuring and Monitoring Air Quality in Confined Spaces

León Sangabriel María Guadalupe*. Reyes-Fernández, Miriam Cristina. Sánchez-Medel, Luis-Humberto*. Posada-Gómez, Rubén****

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huatusco 228-115-0565; e-mail: (lupelen35@gmail.com, lsanchezm@huatusco.tecnm.mx)*

*** Tecnológico Nacional de México / Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo de Orizaba; e-mail: (miriam.rf@crodeorizaba.tecnm.mx, dir_crodeorizaba@tecnm.mx)*

Abstract: This paper presents the design and development of a mobile robot for measuring and monitoring air quality in confined spaces, with a specific focus on greenhouse environments. The primary objective is to create an autonomous system that mitigates the risks posed by hazardous gases and environmental factors—including CO2, ozone, particulate matter (PM2.5 and PM10), temperature, humidity, and UV radiation—to both crop health and worker safety. The methodology encompassed a comprehensive engineering process, beginning with a compact 3D-designed chassis constrained to a 30x30cm footprint to ensure navigability within narrow greenhouse aisles. The robust mechanical design incorporates all-terrain wheels for stability and an integrated support structure to securely house the battery, control electronics, and a multi-sensor array. This integration allows for synchronized data acquisition and real-time environmental assessment. Preliminary results from functional testing confirm the platform's operational success. The robot effectively navigates the target environment and reliably collects data on all specified parameters, demonstrating its viability as a tool for continuous air quality assessment. The developed system represents a significant step towards automated environmental management, providing a reliable solution for maintaining an optimal and healthy atmosphere in confined agricultural settings, thereby supporting both plant development and personnel well-being.

Keywords: Air Quality, Mobile Robot, Greenhouse Monitoring, Gas Sensors, Particulate Matter.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica incide directamente en la salud humana, como consecuencia de prolongados periodos de exposición o de la detección tardía de gases tóxicos, partículas suspendidas y microorganismos patógenos (Rollo et al., 2023). Resulta fundamental destacar la relevancia de su medición y monitoreo sistemático para la prevención de enfermedades respiratorias, así como para el control de parámetros como dióxido de carbono, humedad relativa, temperatura y tasa de ventilación, entre otros.

La monitorización de gases en entornos controlados como invernaderos reviste particular importancia para garantizar condiciones atmosféricas óptimas para el desarrollo de los cultivos. La concentración de dióxido de carbono, etileno, ozono y otros compuestos gaseosos influye directamente en procesos fisiológicos vegetales como la fotosíntesis, la respiración y el crecimiento (Mane et al., 2020). La determinación precisa de estos parámetros permite establecer umbrales seguros que aseguren tanto la productividad agrícola como la calidad fitosanitaria de las especies cultivadas (Sun et al., 2022).

Las actividades antropogénicas cotidianas pueden alterar significativamente la calidad del aire interior. Ejemplos representativos incluyen: consumo de tabaco, emisión de agentes biológicos, operación de sistemas de refrigeración y aire acondicionado, liberación de compuestos orgánicos

volátiles, aplicación de productos de limpieza e infiltración de contaminantes externos.
Los factores determinantes de la calidad del aire se clasifican en físicos, químicos y biológicos. Es imperativo considerar los valores límite establecidos por normativas internacionales, los cuales definen si las condiciones atmosféricas son aceptables o constituyen un riesgo para la salud pública.

La medición y monitoreo continuo en espacios confinados permite alcanzar, mantener y optimizar las concentraciones de gases, sustentándose en relaciones dosis-respuesta que garantizan la protección de la salud y el bienestar humano (Keita et al., 2023).

Modelo

El establecimiento de Sistemas de Medición de la Calidad del Aire, SMCA, ha permitido que las autoridades ambientales de la mayoría de las grandes ciudades en el mundo enfrenten con éxito la problemática urbana de la contaminación atmosférica, que es consecuencia inevitable de las actividades industrial, vehicular, y comercial que se llevan a cabo para satisfacer las

necesidades de sus habitantes y dotarlos de servicios (Paithankar et al., 2023).

Los SMCA se han convertido en una herramienta que permite conocer, con niveles aceptables de confiabilidad, la calidad del aire con respecto a contaminantes específicos y formular las estrategias de control y las medidas oportunas y adecuadas para una efectiva Gestión Ambiental (Gunawan et al., 2018). Con la información generada a partir de la operación consistente de los sistemas de medición se obtienen el conocimiento y, mediante la interpretación adecuada, el entendimiento de las tendencias de los contaminantes y su relación con las condiciones meteorológicas y climáticas prevalecientes, que son factores importantes en cuanto a su distribución y densidad espacial y temporal, así como las transformaciones a que se ven sometidos en la atmósfera y los mecanismos que intervienen en su dispersión y transporte.
Los indicadores de la calidad del aire permiten, entre otras cosas, evaluar el estado de la contaminación atmosférica y comunicar al público cuál es la calidad del aire que respira (Lannelongue et al., 2021).
Una de las formas para evaluar la calidad del aire es comparando las concentraciones de los contaminantes obtenidas de las redes de monitoreo con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) publicadas por la Secretaría de Salud.
A través de este sistema se encuentran disponibles las siguientes consultas a partir de los datos validados reportados por los responsables de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire:

- Indicadores relacionados con las normas oficiales mexicanas de la calidad del aire (NOM)
- Evaluación del cumplimiento de los límites de las NOM
- Distribución de días buenos regulares y malos
- Horas por arriba de los límites de una hora de las NOM
- Estadísticas descriptivas, percentiles y comportamientos temporales
- Información histórica validada horaria y de muestreos manuales de partículas y los datos base para el cálculo de los indicadores (máximos diarios, promedios móviles de 8 horas, promedios de 24 horas)

2. METODOLOGÍA

Se planteó el uso de la metodología cuantitativa, debido a los datos continuos que se obtenienen de la calibración de los sensores a utilizar, con un enfoque en el análisis comparativo y estadístico, y una modelación matemática para una representación de datos que pueda ser una manera más práctica de mostrar los resultados obtenidos de la investigación.
El desarrollo de esta metodología se emplea durante los siguientes pasos:

1. Análisis de requerimiento.
2. Investigación de materiales a utilizar.
3. Diseño y creación del robot medidor de la calidad del aire.
4. Calibración de sensores de medición a ocupar.
5. Recolección de datos de la calibración de sensores.
6. Cotejo de datos obtenidos de la calibración con datos precisos.
7. Obtención de datos finales para resultados.
8. Análisis de comparación.

Análisis de requerimiento

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM) NOM-033-STPS-2015 que establece las condiciones de seguridad para realizar trabajos en espacios confinados, se define un espacio confinado como un lugar sin ventilación natural o con ventilación deficiente, donde las personas realizan tareas con acceso y salida limitado y la norma oficial mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006 establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas se pretende la medición de Dióxido de carbono (CO2), Ozono (O3), humedad, temperatura, PM 2.5, PM10 y radiación UV.
En estos entornos, se toman como referencia las medidas ya establecidas en las normas oficiales para definir si el ambiente es seguro para el ser humano, las cuales se pueden observar en la Tabla 1 con sus máximos y mínimos establecidos de las variables a medir.
Como se puede apreciar, la NOM establece para considerar un criterio de suficiencia anual, el límite máximo de partículas menores a 10 micrómetros en un promedio de 24 horas debe ser menor a 75 micrográmos por metro cúbico.

***Tabla* 1**
Límites permitidos de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana

Contaminante	Dato base utilizado para la evaluación	Exposición	Frecuencia Tolerada	Valor límite Indicador con el que se evalúa	Criterio de suficiencia anual	Norma Oficial Mexicana
Partículas menores de 10 micrómetros (PM10)	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	75 µg/m³ Máximo	Por lo menos tres trimestres con al menos el 75% de los promedios de 24 horas válidas	NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014)
		Crónica	---	40 µg/m³ Promedio anual		
Partículas menores de 2.5 micrómetros (PM2.5)	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	45 µg/m³ Máximo		
		Crónica	---	12 µg/m³ Promedio anual		
Ozono (O3)	Dato horario	Aguda	No se permite	0.095 ppm Máximo	Al menos 75% de los datos horarios	NOM-020-SSA1-2014 (DOF, 2014)
	Promedios móviles de 8 horas		No se permite	0.070 ppm Máximo	Al menos 75% de los de los promedios móviles de ocho horas	

Materiales por utilizar

Con los parámetros ya establecidos, se pueden definir los sensores a utilizar para las mediciones, y el circuito del recorrido que debe realizar el robot móvil, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Diseño y creación del robot medidor de la calidad del aire

Por medio del software SolidWorks se realizó un diseño 3D de la carcasa del robot móvil teniendo en consideración que no

debe medir más de 30cm por 30cm debido al espacio disponible para que el robot móvil realice su trayectoria, utilizando llantas todo terreno y un buen soporte para la batería, componentes y sensores que se utilizan. Ese diseño se puede apreciar en la Figura 1.

Tabla 2

Lista de sensores y material a utilizar

Nombre	Cantidad
Sensor de temperatura y humedad de CO_2 SparkFun - SCD41 (Qwiic)	1
Sensor de partículas en suspensión - SPS30	1
SparkFun IoT RedBoard: placa de desarrollo ESP32	1
Sensor UV GY 8511	1
Real Time Clock Module RV-1805(Qwiic)	1
Modulo MQ131	1
Sensor Sharp GP2Y0A02YK0F Analógico 20-150cm	4
4.4:1 Motorreductor de Metal 25Dx48L mm HP	4
Par de Llantas Todo Terreno, Escala 1/10 — 7cm de Ancho	4
Puente H	2
Arduino nano	1

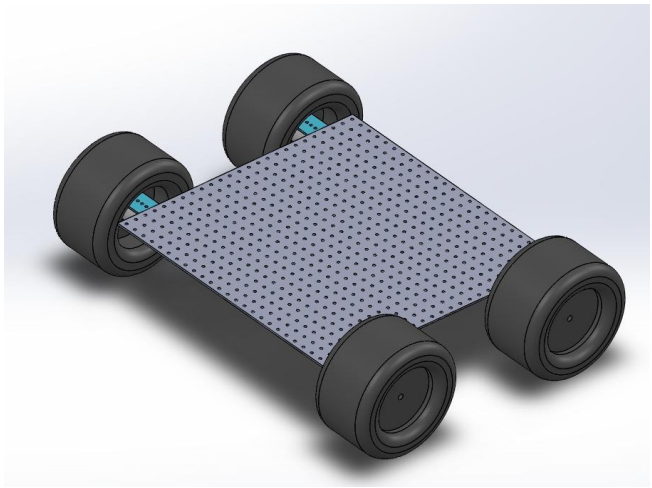


Figura 1. Diseño 3D del robot móvil

Calibración de sensores

Debido al diseño es necesario utilizar dos controladores, una tarjeta para la medición de datos de la calidad del aire y un Arduino nano para el control del robot móvil y la conexión, mostrado en la figura 2.

Diseño del Sistema de Medición de Calidad del Aire y Control de Robot Móvil

1. Arquitectura General del Sistema

El diseño propuesto implementa una arquitectura distribuida que integra dos sistemas de control independientes pero coordinados: un subsistema especializado en monitorización ambiental y otro dedicado al control de movilidad robótica.

Esta segmentación permite optimizar el procesamiento de datos y la ejecución de tareas en tiempo real.

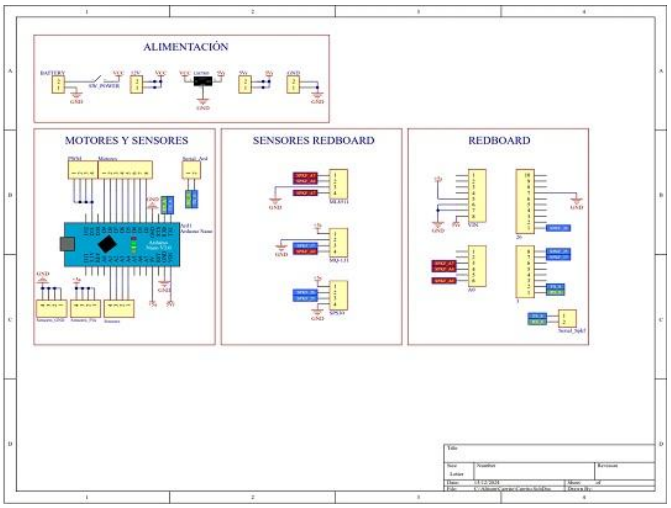


Figura 2. Esquemático de la conexión de los sensores y sus complementos.

2. Subsistema de Medición de Calidad del Aire

Controlador Principal de Adquisición de Datos

- Implementado en una placa de desarrollo ESP32 o similar
- Configuración: 240 MHz de frecuencia, 520 KB de SRAM, conectividad Wi-Fi/Bluetooth integrada
- Funciones específicas:
  - Gestión de comunicación I2C/SPI con sensores ambientales
  - Procesamiento digital de señales mediante filtros Kalman
  - Almacenamiento temporal en buffer circular de 256 muestras
  - Transmisión inalámbrica mediante protocolo MQTT

Tarjeta de Adquisición de Datos Ambientales

- Diseño PCB personalizado con interfaces multimodales
- Especificaciones técnicas:
  - 6 canales ADC de 16 bits para medición precisa
  - Reguladores de voltaje LDO de bajo ruido (3.3V y 5V)
  - Conectores estandarizados Qwiic/STEMMA QT
  - Protección ESD en todas las interfaces

Sensores Integrados

- SGP30: Medición de CO2 equivalente (400-60,000 ppm) y TVOC (0-60,000 ppb)
- BME680: Detección de humedad (±3%), presión (±1 hPa), temperatura (±1.0°C) y VOC
- PMS5003: Contador láser de partículas (PM1.0, PM2.5, PM10)
- MQ-135: Sensor de calidad de aire general (amoniaco, sulfuro, benceno).

3. Subsistema de Control Robótico

Arduino Nano como Controlador de Movilidad

- Microcontrolador ATmega328P a 16 MHz
- Configuración de pines:
  - 6 salidas PWM para control de motores DC
  - 4 entradas digitales para encoders rotatorios

- Interface UART para comunicación con ESP32
- 2 canales ADC para monitorización de batería

Sistema de Propulsión y Navegación

- Motores DC con reductora 30:1 y encoders cuadratura
- Driver motor TB6612FNG con capacidad 1.2A continuo
- Sensores ultrasónicos HC-SR04 para evitación de obstáculos
- Módulo giroscopio/acelerómetro MPU-6050 para odometría

4. Integración de Sistemas

Protocolo de Comunicación Inter-subsistemas

- Interface UART asíncrona a 115,200 baudios
- Estructura de datos JSON con timestamp
- Protocolo maestro-esclavo con ESP32 como coordinador

Alimentación Eléctrica

- Fuente principal: Batería LiPo 3S 11.1V 2200mAh
- Reguladores conmutados buck converter 5V/3A y 3.3V/1A
- Circuito de protección contra sobredescarga
- Consumo estimado: 850mA en operación normal

5. Características de Software

Firmware ESP32

- Sistema operativo en tiempo real FreeRTOS
- 3 tareas principales: adquisición, procesamiento, comunicación
- Algoritmos de compensación térmica y calibración automática

Firmware Arduino Nano

- Control PID para regulación de velocidad de motores
- Navegación autónoma mediante algoritmo bug2
- Mapeo básico de obstáculos en matriz 8x8

6. Especificaciones de Rendimiento

- Resolución de medición: 1 ppm para CO2, 0.1°C para temperatura
- Rango operativo: 0-50°C, 20-90% HR
- Autonomía: 4 horas de operación continua
- Precisión de posicionamiento: ±5 cm en ambiente interior
- Tasa de muestreo: 1 muestra/segundo para todos los sensores

Este diseño permite la caracterización completa de ambientes cerrados mediante un sistema robótico autónomo capaz de generar mapas de contaminación distribuida con referencia espacial precisa.

Recolección de Datos

Una vez implementado el circuito, se adquieren mediciones ambientales de forma continua (a 1 Hz) de CO2, COVs, material particulado, temperatura y humedad, que son almacenadas temporalmente en un buffer. Estos datos, organizados en una estructura tabular con su marca temporal y coordenadas espaciales, permiten generar representaciones gráficas multidimensionales. Estas visualizaciones facilitan el análisis de patrones de contaminación, la identificación de fuentes emisoras y la validación de estrategias de mitigación, constituyendo una herramienta fundamental para la caracterización ambiental cuantitativa.

3. RESULTADOS

Se estableció un rango ideal de humedad relativa de 70 g/m³. El monitoreo se realizó durante un período de 45 días, correspondiente a los meses de abril, mayo y junio, con dos mediciones diarias de 50 minutos cada una. Los datos, promediados diariamente, permitieron observar una clara tendencia a la disminución de los niveles de humedad, atribuible al incremento de las temperaturas propias de la temporada. (Fig. 3)

El estudio del parámetro temperatura, con un valor ideal de 26 °C, se llevó a cabo mediante muestreos diarios iniciando a las 12:00 horas. Cada sesión de medición tuvo una duración de 50 minutos. Los valores obtenidos fueron promediados y este procedimiento se repitió de manera sistemática a lo largo de 45 días consecutivos. (Fig. 4)

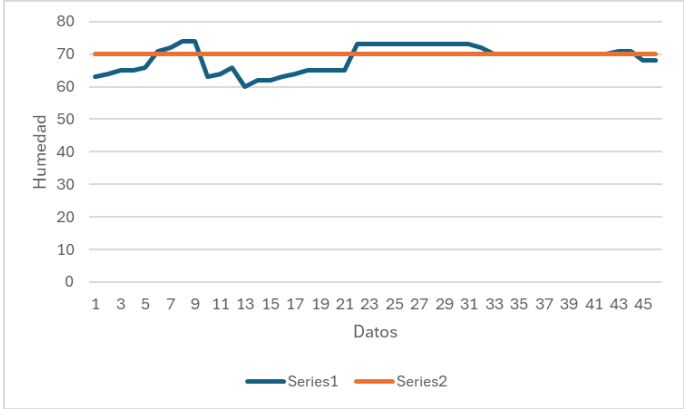


Figura 3. Comportamiento del parametro de humedad

Se monitoreó el comportamiento del parámetro de CO_2, estableciendo una concentración inicial de referencia de 800 ppm en un rango de temperatura de 26 °C a 32 °C. Se consideró una tolerancia mínima de ±50 ppm, atribuible a la interacción de las distintas formulaciones de fertilizantes empleadas para los diferentes cultivos y a la variabilidad en la radiación ultravioleta (UV) que incide en el invernadero. Las mediciones se realizaron durante sesiones diarias de 50 minutos a lo largo de un período de 45 días consecutivos (Fig. 5)

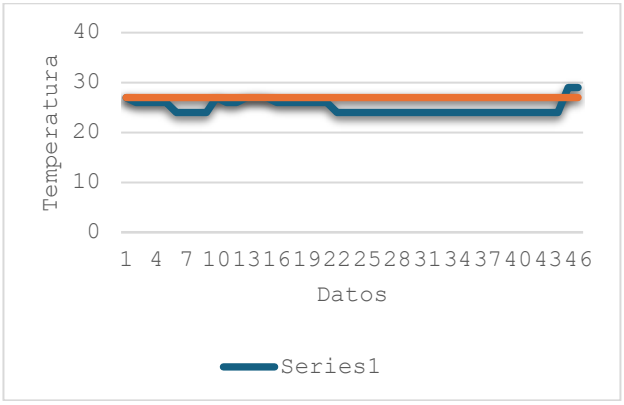


Figura 4. Comportamiento del parametro de temperatura

Se evaluó el desempeño del sistema de telemetría en campo abierto y en un ambiente interior con obstáculos. En campo abierto, se obtuvo un alcance operativo efectivo de **60 metros**, mientras en entornos cerrados, caracterizados por la presencia de obstáculos y multitrayectoria, el rango confiable se redujo a **35 metros**.

El sistema demostró una alta fiabilidad de comunicación, con una tasa de pérdida de paquetes de datos **inferior al 2%,** un retardo promedio en la transmisión de **150 milisegundos**. Por tanto, el sistema cumple con los requisitos de operación para aplicaciones que exigen comunicación estable a distancias superiores a los 30 metros en entornos desafiantes.

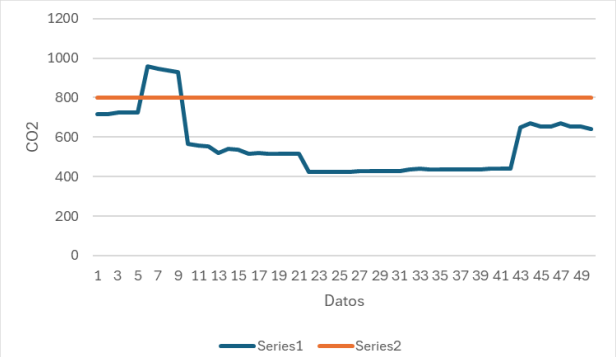


Figura 5. Comportamiento de parametro Co2

4. CONCLUSIÓN

La calidad del aire interior es importante para la salud, el bienestar y la seguridad de las personas. La acumulación de contaminantes como dióxido de carbono (CO2), Humedad, Temperatura, Radiación UV, ozono, materia particulada y microorganismos puede plantear graves peligros. Estos contaminantes pueden causar problemas de salud, como fatiga, dolores de cabeza, irritación respiratoria y enfermedades graves a largo plazo.

Por lo tanto, se deben implementar medidas continuas de monitoreo y control, incluida la ventilación y el uso del aire adecuados. Además, la concienciación y la educación sobre los riesgos de la calidad del aire interior son clave para garantizar un entorno seguro y saludable.

En última instancia, la calidad del aire interior implica una combinación integral de tecnología, regulaciones y mejores prácticas para reducir los contaminantes y proteger la salud de las personas. (*Diseño e Implementación de Un Dispositivo Electrónico Con Conexión a Página Web Para La Identificación y Cuantificación de CO2 y CH4 En Cultivos a Cielo Abierto y Cerrado - ProQuest*, n.d.) Se necesita un enfoque. Vivo en este tipo de ambiente.

REFERENCIAS

Gunawan, T. S., Munir, Y. M. S., Kartiwi, M., & Mansor, H. (2018). Design and implementation of portable outdoor air quality measurement system using arduino. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *8*(1). https://doi.org/10.11591/ijece.v8i1.pp280-290

Keita, S., Noirez, S., Berthe, G., Vinsot, A., Kim, B. S., Mascle, M., Lundy, M., & Garcia, B. (2023). Development of quantitative detection method for mass spectrometry coupled to an infrared laser spectroscope (Picarro) to monitor in nitrogen matrix a complex gas mixture of H2, He, CO, N2, Ne, O2, Ar, CO2, H2S, CH4, C2H4, C2H6, C3H6, C3H8, i-C4H10, n-C4H10, and C5H12. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, *37*(19). https://doi.org/10.1002/rcm.9614

Lannelongue, L., Grealey, J., & Inouye, M. (2021). Green Algorithms: Quantifying the Carbon Footprint of Computation. *Advanced Science*, *8*(12). https://doi.org/10.1002/advs.202100707

Mane, S. A., Nadargi, D. Y., Nadargi, J. D., Aldossary, O. M., Tamboli, M. S., & Dhulap, V. P. (2020). Design, development and validation of a portable gas sensor module: A facile approach for monitoring greenhouse gases. *Coatings*, *10*(12). https://doi.org/10.3390/coatings10121148

Paithankar, D. N., Pabale, A. R., Kolhe, R. V., William, P., & Yawalkar, P. M. (2023). Framework for implementing air quality monitoring system using LPWA-based IoT technique. *Measurement: Sensors*, *26*. https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100709

Rollo, F., Bachechi, C., & Po, L. (2023). Anomaly Detection and Repairing for Improving Air Quality Monitoring. *Sensors*, *23*(2). https://doi.org/10.3390/s23020640

Sun, Y., Yin, H., Wang, W., Shan, C., Notholt, J., Palm, M., Liu, K., Chen, Z., & Liu, C. (2022). Monitoring greenhouse gases (GHGs) in China: status and perspective. *Atmospheric Measurement Techniques*, *15*(16). https://doi.org/10.5194/amt-15-4819-2022

Design and Validation of a High-Resolution Image Capture System for Focus Stacking of Agricultural Plant Leaf Images

Modesto Medina-Melendrez, *Diana Karina Jacobo-Rubio, Juan Carlos González-Nava

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán, Av. Juan de Dios Bátiz 310 Pte. Col. Guadalupe, C.P. 80220, Culiacán, Sinaloa.*

E-mail: D20171595@culiacan.tecnm.mx

Abstract: This paper presents the design and validation of a high-resolution image capture system that can be used to generate sharp and high-resolution images of agricultural plant leaves. To address the inherent depth-of-field limitation in small-object photography and the variable magnification introduced by refocusing at different distances, we propose a system that keeps the camera static while moving the object of interest along a controlled vertical axis. For system validation, a test with 30 captured images of a sample within a 1-square-inch transversal area is reported. The image captures were taken at distances spaced 1 mm apart, covering a depth of 3 cm. This work demonstrates that moving the object instead of the camera is an effective solution for obtaining quality data, thereby overcoming fundamental challenges in image acquisition for automated analysis of agricultural plant leaves.

Keywords: High-resolution imaging, Focus Analysis, Focus Stacking, Plant Leaf Imaging.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de sistemas para la captura de imágenes de plantas agrícolas ha sido necesario en diversidad de trabajos de investigación durante las últimas décadas. Se ha demostrado que el análisis de imágenes digitales permite un análisis objetivo y reproducible, superando las limitaciones de la inspección manual de las hojas, un método que consume tiempo y es propenso a que se comentan errores humanos (Gómez-Camperos, Jaramillo and Guerrero-Gómez, 2021), (Mukesh Dalal, 2025), (Cao, Sun and Bao, 2025).

La tendencia hacia la automatización ha generado una variedad de soluciones. Investigaciones previas han analizado y propuesto metodologías para la detección de problemas en cultivos; por ejemplo, el trabajo reportado por (Bernal López and Medina Melendrez, 2020) se enfocó en la detección de ninfas de mosca blanca sobre hojas de tomate. Aunque su sistema era capaz de detectar las ninfas por sus formas elípticas irregulares, presentaba algunas limitaciones, como una alta propensión a obtener falsos positivos y negativos en algunos casos por la falta de nitidez en las imágenes, lo que provocaba precisiones de máximo el 85% al detectar las ninfas. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado trabajos enfocados hacia el uso de imágenes obtenidas mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes, inteligencia artificial y el aprendizaje profundo.

Por ejemplo, la propuesta reportada por (Gómez-Camperos, Jaramillo and Guerrero-Gómez, 2021) describe el uso de clasificadores neuronales para la detección de plagas en hojas de frijol y papa con tasas de reconocimiento de hasta el 89%, mientras que otros han utilizado el aprendizaje profundo con imágenes aéreas de drones para la identificación de plagas en hojas de soya con una precisión del 91%. Otro ejemplo es el trabajo descrito por (Jacobo-Rubio and Medina-Melendrez, 2023), este representa un avance al proponer un sistema inteligente con una etapa de preprocesamiento, entrenamiento de la red *YOLO V2* y una etapa de filtrado para la detección de ninfas de mosca blanca, alcanzando precisiones de hasta un 97% al detectar ninfas de mosca blanca. Sin embargo, su principal limitación radicó en el uso de imágenes borrosas en su conjunto de entrenamiento, lo que comprometía la capacidad del sistema para funcionar de manera óptima en condiciones poco ideales.

Otra aplicación se encuentra en el trabajo reportado por (M.C. Villasana-Montes *et al.*, 2023), este propone una solución automatizada para la inspección de cultivos. Su principal ventaja radica en la capacidad para la detección temprana de problemas como enfermedades, plagas y estrés hídrico. A pesar de las ventajas reportadas, esto es más una propuesta de diseño que un sistema completamente implementado y validado en la práctica.

No obstante, un reto constante en la captura de objetos pequeños como los insectos y objetos irregulares, como lo son las hojas, es la profundidad de campo limitada. Este efecto óptico hace que solo una parte del objeto esté enfocada, mientras que el resto permanece desenfocado (Wlodek, Gofron and Cai, 2019), lo cual impide el análisis preciso de la muestra completa. Para mitigar este problema, se han propuesto varias técnicas para la obtención de imágenes de calidad, siendo el apilamiento de enfoque (*focus stacking*) o la captura de imágenes a múltiples distancias focales las más destacadas.

La mayoría de los sistemas existentes para la captura de múltiples planos focales implican el movimiento de la cámara o del sistema óptico, esto puede introducir alteraciones en la magnificación y posición de las diferentes zonas de las imágenes debido a la variación en la distancia (Audira *et al.*,

2022). También es importante señalar alternativas como el uso de cámaras plenópticas en conjunto con cámaras RGBD (Hazirbas *et al.*, 2018) que permiten la reconstrucción de la profundidad mediante el análisis de enfoque, sin embargo, se sacrifica resolución en comparación con los sensores tradicionalmente utilizados haciendo insuficiente su capacidad para representar con detalle la morfología de objetos pequeños en un área de 1 in^2.

Por lo que, el presente artículo tiene como objetivo describir el desarrollo y validación de un sistema de captura de imágenes de alta resolución (25 megapíxeles) de hojas de plantas mediante un barrido en profundidad del objeto de estudio, de tal manera que cualquiera de sus regiones se encuentre enfocada en alguna de las imágenes capturadas. Este requisito reside en la necesidad de obtener un conjunto de imágenes que contengan una profundidad de campo de hasta 3 centímetros, lo que permite un análisis más completo en un área transversal de una pulgada cuadrada del objeto de estudio. El desarrollo e implementación de este sistema, busca representar un avance hacia la automatización del proceso de monitoreo en la agricultura 4.0.

2.TRABAJOS RELACIONADOS

El apilamiento de enfoque (*focus stacking*) es un método crucial en micro y macrofotografía, permite generar una única imagen completamente enfocada a partir de múltiples capturas tomadas a diferentes distancias. La literatura reciente destaca tanto sus ventajas como las limitaciones que esta técnica presenta.

Diversos estudios se han centrado en la optimización de las técnicas de apilamiento de enfoque para aplicaciones específicas. Por una parte, (Wlodek, Gofron and Cai, 2019) reporta que esta tecnología tiene múltiples aplicaciones, desde el reconocimiento facial hasta la producción de modelos precisos de muestras. Sin embargo, indica que la continuidad de la imagen puede verse afectada por falta de correspondencia entre algunas imágenes y el costo computacional es elevado al realizar la renderización del modelo 3D del objeto capturado.

Se han propuesto nuevos enfoques metodológicos para mejorar la precisión y la eficiencia de esta aplicación. Por ejemplo, en (Audira *et al.*, 2022) se presenta un método variacional del plano focal para determinar mapas de profundidad con resultados superiores a las técnicas clásicas. No obstante, se reporta una desventaja clave: la falta de contraste en algunas regiones de la reconstrucción.

En busca de mejorar la calidad de la imagen, el trabajo reportado en (Danyal *et al.*, 2025) aborda la fusión de imágenes con múltiples enfoques utilizando técnicas de detección de bordes, sin embargo, este trabajo centró su propuesta a un tipo particular de imágenes.

La incorporación de la inteligencia artificial ha generado nuevas estrategias para superar los desafíos del apilamiento de enfoque. En (Araujo, Ponce and Mairal, 2023) se propone un algoritmo de aprendizaje profundo entrenado con una nueva base de datos de imágenes de alta resolución, demostrando una mayor tolerancia al ruido que otros métodos. Pese a esta ventaja, el sistema requiere un alto costo computacional para el entrenamiento del modelo, y su generalización a una variedad más amplia de imágenes podría ser limitada. Un trabajo similar, llamado “FocusALL”(Madhu S. Sigdel, Imren Dinc and S. Aygun., 2016) presenta una técnica de apilamiento que reduce los problemas de discontinuidad. Sin embargo, sus autores reconocen que puede generar bordes artificiales en la imagen de salida y no aborda problemáticas como la correspondencia entre píxeles de las imágenes capturadas.

Más allá de los avances en los algoritmos, la literatura también destaca las limitaciones en los sistemas de captura. En (Audira *et al.*, 2022) se reporta que el apilamiento de imágenes es crucial para la micro y macrofotografía, pero su implementación tradicionalmente ha utilizado instrumentos costosos para lograr alta precisión. Aunque el trabajo propone un sistema más económico, menciona desventajas como la imposibilidad de controlar la apertura y el tiempo de exposición, lo cual aumenta el ruido en la imagen, especialmente con grandes aumentos y no explora la correspondencia entre píxeles.

En general, la mayoría de los sistemas de apilamiento de enfoque implica mover el sistema óptico de la cámara, lo que puede generar problemas de correspondencia entre las diferentes imágenes, evidente en el cambio de tamaño de los objetos que aparecen en ellas.

En contraste, en lugar de mover la cámara, se propone un sistema en el que el objeto se desplaza de manera controlada en un eje vertical. Este enfoque tiene el potencial de eliminar los problemas inherentes al movimiento, asegurando que el plano focal se mantenga fijo. Al obtener una serie de imágenes de alta calidad de manera precisa y controlada, se busca que, apoyados con la técnica de apilamiento de enfoque, se puedan generar imágenes completamente enfocadas de hojas de plantas.

3. MATERIALES Y METODOS

En esta sección se describe el desarrollo y la validación del sistema propuesto, cuyo diseño se centra en la precisión del posicionamiento del objeto de estudio para obtener una imagen totalmente enfocada a diferentes distancias. La metodología se divide en tres etapas principales: la configuración del hardware, el proceso de adquisición de imágenes y el procesamiento de datos.

3.1. Configuración del hardware

El sistema se basa en una configuración robusta y controlada para garantizar precisión en la captura, cumpliendo con la capacidad de capturar un área de $1in^2$, tener imágenes de alta resolución y utilizar un sistema de movimiento preciso.

Se utiliza una cámara de alta resolución equipada con un sensor SONY Exmor IMX511 CMOS para la captura de imágenes. Este sensor tiene una resolución de 4927 x 4927 píxeles, lo que se traduce en una resolución de hardware de aproximadamente 25MP. El tamaño de píxel de 1.12 µm x 1.12 µm es fundamental para capturar detalles microscópicos con detalle. La interfaz USB 3.0 (5 Gbps) de la cámara garantiza una alta velocidad de transferencia de datos necesaria para el manejo del gran volumen de información generado en cada captura. Se seleccionó un arreglo de lentes

que ayudan a obtener imágenes de un área de al menos $1in^2$, el sistema óptico utilizado puede lograr aumentos de 10 a 80X con un campo de visión de 12mm hasta los 50mm.

Para lograr el campo de visión requerido, se instaló el sistema sobre una base de metal de 650 mm x 380 mm x 30mm que proporciona la estabilidad necesaria para el equipo, eliminando vibraciones que podrían comprometer la calidad de las imágenes. También se cuenta con un tubo de 650 mm de largo con 25 mm de diámetro para sostener la cámara, asegurando la distancia focal requerida para la captura de muestras a diferentes profundidades y con áreas transversales de análisis de al menos una pulgada cuadrada.

Para realizar el movimiento de la muestra, se emplea una plataforma de elevación motorizada PT-GD401. Esta plataforma es impulsada por un motor paso a paso y cuenta con especificaciones de alta precisión: la distancia mínima de ajuste es de 5 µm y repetibilidad de 10 µm, para garantizar movimientos controlados y exactos. Adicionalmente, se integra un sensor de distancia que proporciona una señal de retroalimentación de la posición del sistema, para que el usuario tenga la información necesaria de la distancia entre la base móvil donde se encuentra el objeto y la cámara. Esto se requiere ya que la plataforma motorizada no garantiza repetibilidad en el posicionamiento de manera consistente. El sensor empleado es capaz de medir la distancia de la muestra de estudio en un rango de 3 cm con una resolución de 100 µm. Este sensor se adaptó en una plataforma extra para evitar que interfiriera con el movimiento del objeto a una distancia de 15 mm entre la plataforma y el sensor.

La configuración del sistema implementado para capturar imágenes con un barrido del objeto de estudio a diferentes distancias se muestra en la figura 3.1

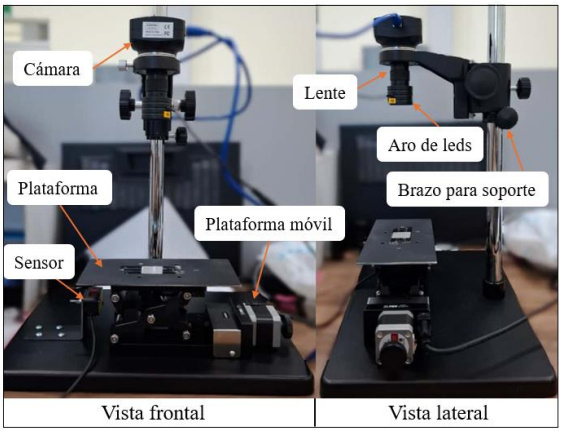


Figura 1. Sistema para la captura de imágenes a múltiples distancias.

3.2. Proceso de captura y procesamiento de imágenes

La metodología de captura fue diseñada para obtener un conjunto de imágenes que abarque una profundidad de campo extendida, superando las limitaciones de la fotografía a corta distancia. En lugar de mover la cámara, se optó por mover el objeto de estudio para mantener fija la distancia de enfoque de la cámara, lo que minimiza los problemas de magnificación de la imagen.

Para la validación del sistema de captura, se diseñó y fabricó una pieza de prueba mediante impresión 3D. Este objeto que tiene un área de $1in^2$, se dividió en una cuadrícula de 5x5. Cada una de las 25 divisiones se diseñó con una altura única y controlada, variando desde 0.40 mm hasta 1 mm. Este diseño escalonado tiene como objetivo permitir la evaluación del enfoque del sistema en diferentes profundidades. Para cuantificar la resolución en cada punto de la superficie, se incorporó una Estrella de Siemens en cada una de las 25 divisiones. La estrella de Siemens actúa como un patrón de prueba para mediciones de enfoque y resolución, permitiendo una medición precisa de la capacidad del sistema para mantener la nitidez en cada una de las distancias de captura. Esta pieza se puede observar en la figura 3.2.

Figura 2. Pieza de prueba escalonada para el análisis de enfoque a múltiples distancias.

El proceso de adquisición de imágenes se realizó de la siguiente manera: primero se centró el objeto de interés en la plataforma móvil, asegurando que su posición se mantuviera constante; después, se utilizó el sensor de distancia para medir con precisión la posición del objeto, permitiendo al sistema capturar imágenes a diferentes distancias; finalmente, en la prueba reportada, se tomaron 30 imágenes de la muestra de estudio a distancias equidistantes de 1mm.

Aunque el software devuelve lecturas del sensor con alta precisión, el ajuste de la posición de la plataforma motorizada se realizó de forma manual. El objetivo fue lograr posiciones con precisiones en un décimo de milímetro. Esta tolerancia es técnicamente aceptable porque la resolución nativa del sensor, combinada con la distribución de las alturas de la pieza de prueba, nos permiten asegurar un espaciado de 1 mm entre las tomas realizadas al objeto de análisis, lo que permite que todas las zonas del objeto queden registradas con nitidez en algunas de las capturas. Así, las variaciones en las centésimas y milésimas de milímetro se consideran poco significativas, pues el espaciado de 1mm garantiza que la secuencia de adquisición capture toda la información del objeto para la reconstrucción final.

La figura 3 muestra un ejemplo ilustrativo de las etapas del preprocesamiento del conjunto de imágenes. Se define el tamaño de cada región de análisis con los parámetros tx (número de columnas) y ty (número de renglones), el cual es definido por el usuario. La elección del tamaño de la región influye directamente en el resultado de la fusión y en el costo computacional. Por ejemplo, en la figura 5 se muestra una imagen recuperada al emplear regiones de análisis de 985x985 pixeles, mientras que en la figura 6 se obtuvieron las imágenes recuperadas al emplear regiones de análisis de

64x64 pixeles. Así el sistema permite esta flexibilidad para balancear la precisión con la eficiencia del procesamiento dependiendo de la necesidad del usuario.

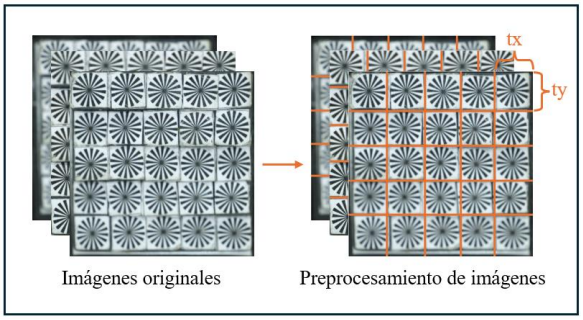


Figura 3. Imagen ilustrativa del preprocesamiento del conjunto de imágenes de un objeto de interés.

Una vez segmentada la imagen, se aplica la métrica de enfoque en cada región de análisis con el fin de evaluar su nitidez o enfoque. Para la selección de métricas, se tomaron como referencia las reportadas en (Pertuz, Puig and Angel, 2013). Se eligieron aquellas que fueron reportadas como las que producen mejores rendimientos. Entre este grupo, las métricas con el desempeño más destacado fueron *la suma de coeficientes de Wavelet* de la ecuación (1) y la de *Tenegrand* de la ecuación (2).

$$\phi = \sum_{(ij\in\Omega_D)} |W_{LH1}(i,j)| + |W_{HL1}(i,j)| + |W_{HH1}(i,j)|, \quad (1)$$

donde Ω_D representa la ventana de análisis y los arreglos W representan las subbandas de características de la imagen a analizar: W_{HH1} contiene las características en diagonal, W_{LH1} las horizontales y W_{HL1} las verticales.

$$\phi = \sum_{(ij)\epsilon\Omega_D} (G_x(i,j)^2 + G_y(i,j)^2), \quad (2)$$

donde $\Omega(x,y)$ representa la ventana de análisis, G_x es la derivada mediante Sobel en el eje x de la imagen a analizar y G_y es su derivada en el eje y.

Estas métricas cuantifican la cantidad de detalle con el fin de generar un perfil de enfoque que se asemeje a una curva de campana, donde el pico más alto corresponde a la posición del enfoque óptimo. La figura 3.4. muestra dos ejemplos de la evaluación del enfoque de las regiones de análisis mediante la métrica de enfoque *Tenedgrand*.

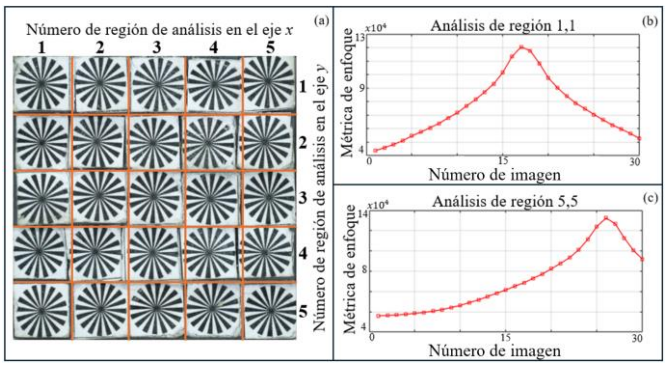


Figura 4. Ejemplos de la evaluación de enfoque en regiones de análisis. (a) Imagen enfocada recuperada; (b) Mediciones de enfoque de la región de análisis (1,1); (c) Mediciones de enfoque de la región de análisis (5,5).

Tras la etapa de cuantificación del nivel de enfoque, el sistema procede a la reconstrucción de la imagen final mediante la técnica de Apilamiento de Enfoque (Focus Stacking). Este proceso tiene como objetivo generar una imagen compuesta con una profundidad de campo totalmente extendida a partir de la secuencia de imágenes fuente.

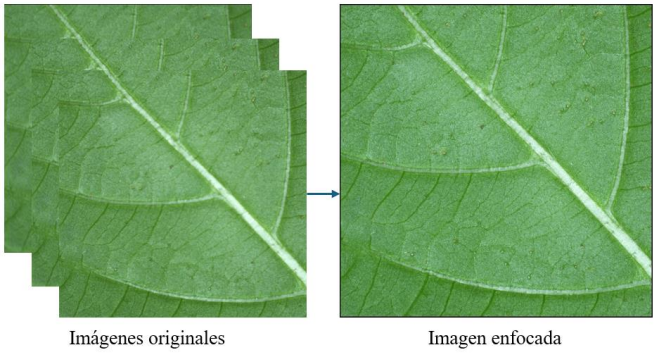


Figura 5. Imagen representativa del proceso a partir del conjunto de imágenes (30 imágenes) generar una imagen completamente enfocada.

Para lograr lo anterior, el sistema selecciona automáticamente la región con el mejor puntaje de cada sección para formar la imagen final. Este proceso de reconstrucción se realiza recortando y combinando las secciones más nítidas de cada una de las imágenes originales, garantizando que el resultado sea una imagen compuesta totalmente enfocada que abarca la profundidad de campo completa de la muestra. La figura 5 muestra un ejemplo de una imagen final al seleccionar las regiones mejor enfocadas de cada imagen del conjunto de imágenes.

4. RESULTADOS

La utilidad del sistema se verificó al realizar varias pruebas de reconstrucción de hojas nítidas a partir de 30 imágenes capturadas de cada objeto de estudio a diferentes distancias en un rango de 3 cms.

En la figura 6 se muestra una prueba realizada a una hoja de tomate con presencia de algunos especímenes de plagas y signos de daño. Se muestra como a partir de un conjunto de imágenes tomadas a diferentes profundidades se reconstruyen imágenes totalmente nítidas al emplear la técnica Focus Stacking con las métricas de enfoque de la ecuación (1) (figura 6(a)) y de la ecuación (2) (figura 6(b)). Las imágenes resultantes se encuentran nítidas en toda su superficie, demostrando que el procesamiento de imágenes y las técnicas utilizadas seleccionan de manera efectiva las regiones enfocadas. En esta prueba, con el propósito de obtener resultados más precisos se especificaron regiones de análisis con tamaños de 64x64 pixeles.

A pesar de que el proceso de fusión mostró resultados visualmente favorables, el análisis detallado de la imagen final revela irregularidades en las uniones de las diferentes regiones de análisis. Esto sugiere que, si bien el problema de la adquisición de datos ha sido resuelto con éxito a nivel de hardware, se requieren métodos más avanzados en el

algoritmo de fusión para lograr una integración más natural de las diferentes regiones que conforman la imagen final. Por ejemplo, en las recuperaciones de la figura 6 se puede observar que se presenta menos ruido visible en áreas planas, sin embargo, en las fronteras de las regiones fusionadas (donde ocurre la transición de las regiones de análisis de 64x64 pixeles) se pueden generar efectos de solapamiento.

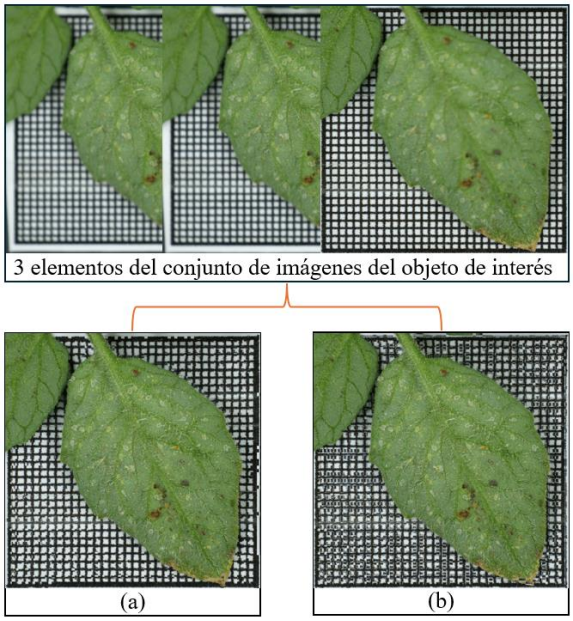


Figura 6. Representación del conjunto de imagen y comparación de imágenes resultantes obtenidas de una hoja de tomate dañada e infestada. (a) Imagen obtenida utilizando la suma de coeficientes de Wavelet; (b) Imagen reconstruida utilizando la métrica Tenengrand

Por lo que, el sistema de captura desarrollado demostró ser funcional y preciso al capturar la secuencia de imágenes necesaria para la realización del apilamiento de enfoque en la generación de imágenes nítidas de hojas de plantas, como las que requieren las aplicaciones de detección de plagas, enfermedades y estrés hídrico en estas hojas.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo abordó un desafío fundamental de la microfotografía: la limitada profundidad de campo. En este estudio, se propuso y validó una metodología para superar este problema. Para lo que se desarrolló un sistema que mantiene la cámara fija y desplaza el objeto de interés a lo largo de un eje vertical controlado, con el que se logran capturas de imágenes de alta calidad de manera precisa y repetible. El uso de la plataforma motorizada permite capturar una serie de imágenes con diferentes grados de enfoque del objeto de estudio, a partir de las cuales se demostró que se pueden generar imágenes nítidas al emplear la técnica apilamiento de enfoque.

REFERENCES

Araujo, A., Ponce, J. and Mairal, J. (2023) 'Towards Real-World Focus Stacking with Deep Learning'. Available at: http://arxiv.org/abs/2311.17846.

Audira, G. *et al.* (2022) 'A Fast and Cost-Effective (FACE) Instrument Setting to Construct Focus-Extended Images', *Inventions*, 7(4), p. 110. doi: 10.3390/INVENTIONS7040110/S1.

Bernal López, O. F. and Medina Melendrez, M. G. (2020) *Sistema de captura y procesamiento digital de imagenes para el conteo de mosca blanca en estado ninfal sobre hojas de tomate*. Tecnológico Nacional de México.

Cao, Z., Sun, S. and Bao, X. (2025) 'A Review of Computer Vision and Deep Learning Applications in Crop Growth Management', *Applied Sciences*, 15(15), p. 8438. doi: 10.3390/app15158438.

Danyal, M. M. *et al.* (2025) 'Multi Focus Image Fusion using Image Enhancement Methods', pp. 57–72.

Gómez-Camperos, J., Jaramillo, H. and Guerrero-Gómez, G. (2021) 'Técnicas de procesamiento digital de imágenes para detección de plagas y enfermedades en cultivos: una revisión', *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 24(1). doi: 10.25100/iyc.v24i1.10973.

Hazirbas, C. *et al.* (2018) 'Deep Depth From Focus', in *Computer Vision – ACCV 2018. Lecture Notes in Computer Science.* Springer, Cham, pp. 525–541. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20893-6_33.

Jacobo-rubio, D. K. and Medina-Melendrez, M. (2023) 'Sistema inteligente para la detección de ninfas de mosca blanca presentes en hojas de plantas Intelligent System for the Detection of Whitefly Nymphs Presents on Plant Leaves', 152(9), pp. 187–200.

M.C. Villasana-Montes *et al.* (2023) 'Diseño de sistema de monitoreo para detección temprana de enfermedades y plagas superficiales en plantas mediante visión artificial', *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11, pp. 221–230. Available at: https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/11369/10685 (Accessed: 10 October 2025).

Madhu S. Sigdel, M. S. D., Imren Dinc, M. L. P. and S. Aygun. (2016) 'FocusALL: Focal Stacking of Microscopic Image Using Modified Harris Corner Response Measure', *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform*, pp. 326–340. doi: 10.1109/TCBB.2015.2459685.

Mukesh Dalal, P. M. (2025) 'A systematic Review of Deep Learning-Based Object Detection in Agriculture: Methods, Challenges, and Future Directions', *Computers, Materials & Continua*. doi: 10.32604/cmc.2025.066056.

Pertuz, S., Puig, D. and Angel, M. (2013) 'Analysis of focus measure operators for shape-from-focus', *Pattern Recognition*, 46(5), pp. 1415–1432. doi: 10.1016/j.patcog.2012.11.011.

Wlodek, J., Gofron, K. J. and Cai, Y. Q. (2019) 'Achieving 3D imaging through focus stacking', *AIP Conference Proceedings*, 2054(January). doi: 10.1063/1.5084619.

Direct vs. Progressive Learning Transfer: A Comparative Analysis of Robustness and Accuracy in Lightweight Architectures for Corn Leaf Disease Classification

Villalobos Uribe Luis F.*, Reveles Gómez Luis C.*, Sifuentes Gallardo C., Serrano Talamantes José F.****

** Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México (Tel: 492 925 6690 Ext. 1950; e-mail: direccion.ingenieria@uaz.edu.mx).*

*** Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, Postgraduate Department, Av. Luis Enrique Erro S/N, Gustavo A. Madero, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Ciudad de Mexico D.F. 07738, Mexico*

Abstract: This study focuses on the diagnosis of diseases in corn crops (Zea mays) using lightweight convolutional neural networks for precision agriculture. The main objective was to compare two training methods: direct transfer (from ImageNet) and progressive transfer, which uses an intermediate domain (from the PlantVillage dataset) before reaching the corn-specific data. Two state-of-the-art neural network architectures, MobileNetV3-Small and EfficientNetB0, were evaluated. The performance of both was measured through a rigorous cross-validation protocol (5 folds) and a blind test to ensure the reliability of the results. It was concluded that the EfficientNetB0 architecture was the most accurate, achieving an average accuracy of 93.85% in cross-validation and 94.27% in the blind test, outperforming MobileNetV3-Small with an average accuracy of 93.47% and 93% in the blind test. A key finding was that intermediate pre-training did not offer significant improvements, as direct transfer marginally outperformed the method in both architectures. Future research could incorporate images taken in field conditions, in addition to the use of explainable artificial intelligence.

Keywords: Deep Learning, Precision Agriculture, lightweight CNN models, transfer learning.

1. INTRODUCTION

Modern agriculture faces the constant challenge of maximizing production and minimizing losses due to diseases, which can reduce crop yields. Traditional methods of detecting plant diseases rely on visual inspection by experts, which are often subjective, labor-intensive, costly, and time-consuming, potentially delaying crucial interventions and resulting in significant yield losses [1]. To address this, artificial intelligence (AI), and specifically deep learning, has emerged as a transformative technology. Unlike classical machine learning approaches that rely on manual feature engineering (extracting edges, textures, and segmentation), Convolutional Neural Networks (CNNs) are capable of automatically and hierarchically learning feature representations directly from raw pixel data [2]. This automated process has proven to be very effective for image analysis tasks. The success of pioneering architectures such as AlexNet in the ImageNet challenge [3] catalyzed their adoption in a wide range of domains, one of which is precision agriculture, where they have been applied to the classification of diseases for numerous crops [4].

Corn (*Zea mays*) is one of the most important crops worldwide, and its importance is threatened by various diseases such as common rust, blight, and gray leaf spot, which directly affect the quality and quantity of the harvest [5]. Consequently, the automatic and accurate detection of these pathologies has become an area of great research interest. Research focuses on demonstrating the viability of CNNs using "heavy" architectures known for their high accuracy but high computational cost [6][7]. For example, the ResNet architecture is one of the most widely used due to its robustness and high accuracy rates. Studies have reported remarkable accuracies for the classification of diseases in corn, such as 97.19% for ResNet50 and 97.55% for ResNet101(2025). In addition, another study achieved 95.59% with ResNet50 [6]. Very good results were obtained with DenseNet, which connects each layer to all subsequent layers to improve information flow and feature reuse, reporting an accuracy of 98.06% in a study of corn diseases[7] .

As the field has matured, the focus has shifted from simple proof of concept to practical implementation. This has driven a shift from heavy architecture to lightweight architecture that allows us to be efficient with limited resources. This is the case with MovileNet and EfficientNet architectures, which are based on a series of architectural innovations designed to drastically reduce computational load while maintaining high representation capacity [8][9]. Transfer learning (TL) is used to train these models, which is one of the most important and successful techniques in modern computer vision. This is based on the idea that a model trained on a specific task can reuse its knowledge to learn a new related task more efficiently [10][8]. The benefits of this approach are manifold: it reduces training time and requires less computational power. This is because the pre-trained model has already learned to recognize patterns that are useful in vision tasks [11]. Despite its success, transfer learning has limitations. Its effectiveness decreases as the "domain gap" between the original dataset (e.g., ImageNet)

and the target (e.g., corn leaf images) increases. This mismatch can lead to problems such as "catastrophic forgetting" (the model loses useful general features when adapting to the new task) or a biased model that is difficult to adapt [12].

2. METHODOLOGY

This section details the databases, architectures, and procedures used to carry out comparative analysis of transfer learning strategies. Figure 1 illustrates the proposed methodology for classifying diseases in corn leaves. The methodology proposes two training strategies, which differ in the type of training. The process begins with data acquisition, followed by preprocessing, and then the data is used in two different training methods with the EficientNet B0 and MobileNetV3-small architectures, so that through cross-validation (k = 5) we can obtain a more robust result. Finally, the evaluation metrics are obtened.

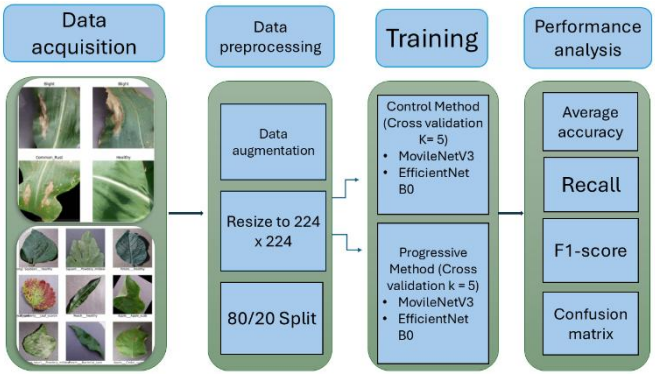


Figura 2. Proposed methodology for the classification of leaf diseases in corn plants.

2.1 Database

The databases used in this study consist of two sets. The first set contains only images of leaf diseases in corn leaves[13] , while the second set corresponds to different leaves from various crops, which also includes different leaf diseases[14] . Both are publicly accessible. The first set, called 'Corn or Maize Leaf Disease', consists of approximately 4,200 images in JPG format, which is the final objective of the classification, and is divided into four different classes: Northern leaf blight ('Blight'), Common Rust ('Common_Rust'), Gray Leaf Spot ('GrayLeaf_Spot'), and Healthy Leaves ('Healthy'). Figure 2 shows a sample of the classes that comprise it.

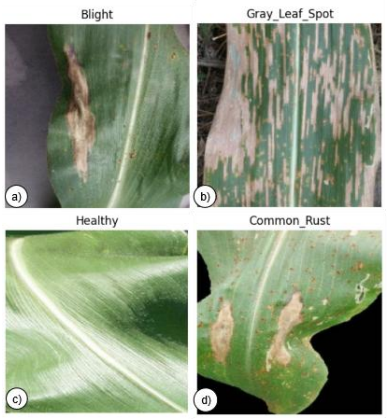


Figura 3. Sample images from the 'Corn or Maize Leaf Disease' database (a) Blight, (b) Gray Leaf Spot, c) Healthy, d) Common Rust.

For the progressive learning strategy, the dataset named 'PlantVillage' was used. This extensive dataset contains around 54,000 images of 34 disease classes in 13 different plant species, providing a rich and diverse context on plant pathologies. Figure 3 shows a sample of five classes that make up this dataset, displaying both diseased and healthy leaves.

Figura 1. Example from the 'PlantVillage' database, a) Grape, b) Peach, c) Blueberry, d) Cherry, e) Orange.

2.2 *Model architecture*

Two lightweight CNN architectures were selected, recognized for their excellent balance between accuracy and computational efficiency, ideal for deployment on mobile devices. MobileNetV3-small, developed by Google, is optimized for low latency on mobile device CPUs. Its efficiency derives from the use of separable convolutions in depth and inverted residual blocks that incorporate attention mechanisms (Squeeze-and-Excite) [15]. Figure 4 shows a diagram of the implementation of the MobileNetV3-Small architecture in the implemented workflow.

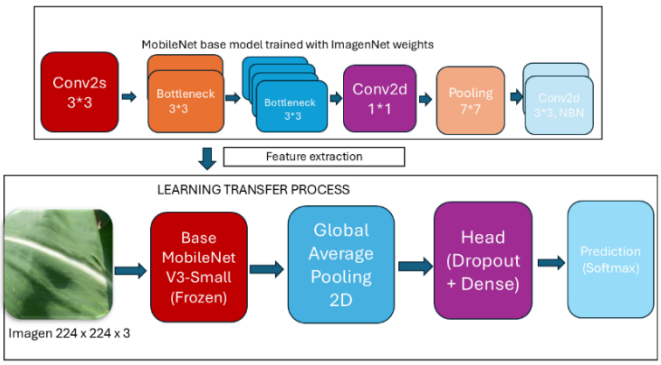
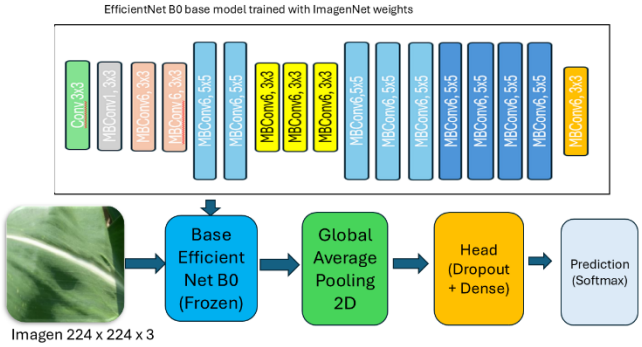


Figure 4 Structure of the Clasification Model Based on the MobieNetV3-Small Architecture, inspired by [14].

EfficientNetB0 is part of a family of architectures that introduces an innovative scaling method called "composite scaling," which uniformly and optimally adjusts the depth, width, and resolution of the network to maximize accuracy within a restricted computational cost. Its fundamental component is MBconv, an evolution of the inverted residual



block [9] [19]. Figure 5 shows a diagram of the implementation of EfficientNet B0 in the workflow.

Figura 4. Structure of the Classification Model Based on the EfficientNet-B0 Architecture, inspired by[16] .

2.3 *Training strategies*

To perform a systematic comparison, two different training methodologies were defined to evaluate the impact of intermediate pre-training. The validation and final training protocol was subsequently applied to the models generated by both strategies:

Control Method (Direct Transfer): In this strategy, the base architectures (MobileNetV3-Small and EfficientNetB0) were initialized using only the standard weights pre-trained on the ImageNet dataset. These models were then trained directly on the corn dataset. Progressive Method (Intermediate Transfer): For this strategy, the base models (initialized with ImageNet weights) were first subjected to an intermediate training phase using the 'Plant Village' dataset. The goal was to adapt the network weights to general characteristics of "plant leaves" before specializing them in the corn domain. The weights resulting from this phase were used as the starting point for the final training on the corn dataset.

2.4 *Training and validation protocol*

To ensure a robust and reliable evaluation, a cross-validation protocol [17] was implemented, in addition to a blind test. A seed (42) was used for the reproducibility of the experiment. For the final training, the corn dataset was divided into 5 stratified folds to maintain the class ratio. In each of the 5 iterations, 4 folds (80%) were used for training and the remaining fold (20%) for validation. For the blind test, 80% was used for training and 20% for validation. The final training process on corn data, applied to the models of both strategies (Direct and Progressive), was carried out in each fold in two phases:

• Phase 1 (classifier training): For 10 epochs, the base convolutional layers of the model were frozen and only the classification head was trained.

• Phase 2 (fine-tuning): For an additional 10 epochs, the entire architecture was unfrozen and retrained with a very low learning rate (1 x 10−5) to subtly adjust the pre-trained weights.

The optimizer implemented was Adam, with a loss function called categorical cross-entropy and a batch size of 32.

3. RESULTS

This section presents the results obtained from the eight training sessions designed, comparing the performance of the MobileNetv3-small and EfficientNetB0 architectures under the direct (control) and progressive transfer learning methodologies.

3.1 Overall performance and comparison of strategies

The final performance of each combination of architecture and training methodology was evaluated using a cross-validation protocol (k = 5). Table 1 summarizes the mean accuracy and standard deviation, allowing for comparison.

Tabla 1. Average validation accuracy (± Estándar Deviation) across 5 folds for each experiment.

Architecture	Control method (Direct)	Progressive method
MovileNetV3	93.47% ± 1.11%	93.00% ± 0.98%
EfficientNetB0	93.85% ± 0.71%	93.80% ± 0.87%

According to Table 1, the EfficientNetB0 architecture demonstrated consistent superiority, outperforming MobileNetV3-Small in both training strategies. It achieved the highest average accuracy in the study (93.85%), as well as greater stability with a standard deviation (±0.71% vs. ±1.11% for MobileNetV3). Second, contrary to the initial hypothesis, the Direct Transfer (Control) method marginally outperformed the Progressive method in both models. For EfficientNetB0, the difference was minimal and not statistically significant (93.85% vs. 93.80%). For MobileNetV3, the advantage of the control method was more pronounced (93.47% vs. 93.00%).

Table 2 Accuracy of the blind test of the models.

Architecture	Control method (Direct)	Progressive method
MovileNetV3	93.00%	92.00%
EfficientNetB0	94.00%	94.27%

According to Table 2, comparing the cross-validation results, we obtained a better score in the progressive method of the EfficientNetB0 architecture.

4.2 Detailed performance of cross-validated models

Table 3 details the performance per class of the MovileNetV3 model trained with the direct transfer methodology. The model demonstrated high effectiveness in classifying the 'Common Rust' class, with an F1 score of 0.98, while the 'GrayLeafSpot' class had a low score of 0.76.

Figura 6 Structure of the Classification Model Based on the

Table 3. MovileNetV3 Classification Report - Direct Method.

Class	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.82	0.95	0.88
Common Rust	0.99	0.97	0.98
Gray Leaf Spot	0.87	0.67	0.76
Healthy	1.00	0.98	0.99

Table 4 details the performance of the MobileNetv3 model, optimized using the progressive training method. The model maintains high performance for the "Healthy" class with an accuracy of 1.00, and for "Common-Rust" with 0.97. However, the "GrayLeafSpot" class continues to score low, with a Recall of 0.77.

Table 4 MovileNetV3 Classification Report - Progressive Approach.

Class	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.83	0.90	0.86
Common Rust	0.99	0.95	0.97
Gray Leaf Spot	0.81	0.73	0.77
Healthy	1.00	1.00	1.00

Table 5 presents the detailed performance of the EfficientNetB0 architecture with the direct transfer method. The model achieves perfect performance in the 'Healthy' (0.99 accuracy) and 'Common_Rust' (0.99 accuracy) classes and a solid score of 0.91 for the 'Blight' class. It continues to perform poorly for the 'Gray Leaf Spot' class, with the lowest Recall score (0.80).

Table 5 EfficientNetB0 Classification Report - Direct Method

Class	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.88	0.94	0.91
Common Rust	0.99	0.96	0.97
Gray Leaf Spot	0.88	0.80	0.84
Healthy	0.99	1.00	1.00

Table 6 shows the detailed performance of the EfficientNetB0 architecture with the Progressive transfer method. The model achieved perfection in the classification of the 'Healthy' class (accuracy of 1.00) and maintained excellent performance for 'Common Rust' (accuracy of 0.98), matching the results of the control method for these highly representative categories. The impact of the progressive method is observed in the remaining two classes. A slight improvement was achieved in the classification of the class with the lowest score in the previous methods, GrayLeafSpot', whose accuracy increased slightly (accuracy 0.87).

Table 6 EfficientNetB0 Classification Report - Progressive Method

Class	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.84	0.96	0.90
Common Rust	0.98	0.98	0.98
Gray Leaf Spot	0.87	0.66	0.75
Healthy	1.00	0.99	0.99

3.2 Confusion matrix with cross-validation

For a comprehensive analysis of error patterns in each model, a confusion matrix was created for each training session. In this matrix, the values located on the main diagonal (from the upper left corner to the lower right corner) denote the number of correct predictions for each class, while the values outside this diagonal indicate incorrect classifications.

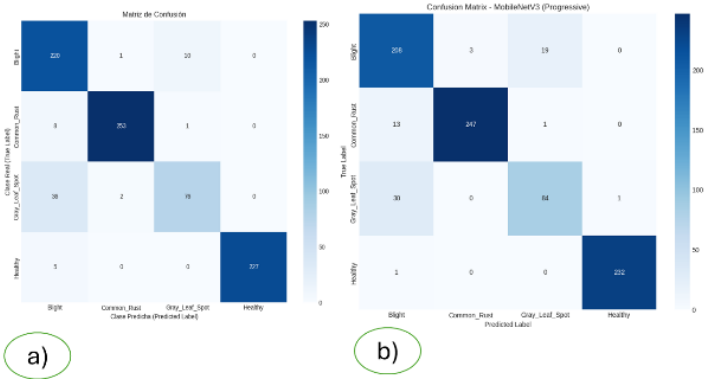


Figura 5. Matriz de confusión de la arquitectura MobileNetV3-Small, (b) transferencia directa, (b) transferencia progresiva.

Figure 4 shows the model trained with the direct method, which shows a high number of correct classifications on the main diagonal, especially the classes 'Common_Rust' (253) and 'Healthy' (227). It can be seen that 10 real instances of 'Blight' were incorrectly assigned to 'Gray_Leaf_Spot'. Similarly, 36 cases of 'Gray_Leaf_Spot' were classified as 'Blight'. The results obtained in the confusion matrix of the progressive method show high performance in the 'Healthy' and 'Common_Rust' classes. Although the number of false

positives for 'Gray_Leaf_Spot' was reduced (only 8 errors from other classes were classified as such), this occurred at the expense of a drastic increase in false negatives.

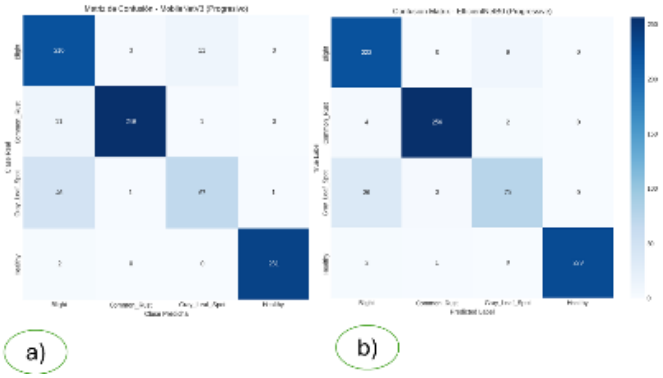


Figure 7. Matriz de confusión de la arquitectura EfficientNetB0, (a) transferencia directa, (b) transferencia progresiva.

Figure 5 shows a comparison of the EfficientNetB0 architecture. For the control method (a), the model correctly classifies 216 instances of the 'Blight' class, 251 of 'Common_Rust', 92 of 'Gray_Leaf_Spot', and 233 of 'Healthy'. Twenty-two images of the 'Blight' class were incorrectly classified as 'Gray_Leaf_Spot', and 36 images of 'Gray_Leaf_Spot' were incorrectly classified as 'Blight' for the progressive method. The correct predictions were 222 for the 'Blight' class, 256 for 'Common_Rust', 75 for 'Gray_Leaf_Spot', and 229 for 'Healthy'. We can highlight how the number of cases of the 'Blight' class misclassified increased by 14.

3.3 Detailed performance of blind test models

Table 7 details the performance by class of the MobileNetV3-Small model trained with the direct transfer methodology using a blind test. The model demonstrated high effectiveness in classifying the 'Common_Rust' class, with an F1-score of 0.98. The 'Gray_Leaf_Spot' class reported the lowest accuracy score of 0.79.

Tabla 7 MovileNetV3 Classification Report - Direct Method

Class	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.89	0.87	0.88
Common Rust	0.98	0.97	0.98
Gray Leaf Spot	0.79	0.82	0.80
Healthy	0.97	1.00	0.98

Table 8 details the performance by class of the MobileNetV3-Small model trained with the progressive transfer methodology. It can be seen that the model maintains high performance for the 'Healthy' class with an accuracy of 1.00 and for 'Common_Rust' with an accuracy of 0.99, while the 'Gray_Leaf_Spot' class continues to have difficulties in classification, with the lowest Recall score of 0.72.

Tabla 8. MovileNetV3 Classification Report - Progressive Method

Class	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.83	0.93	0.88
Common Rust	0.99	0.95	0.97
Gray Leaf Spot	0.85	0.72	0.78
Healthy	1.00	0.99	0.99

La **Table 9** presents the detailed performance of the EfficientNetB0 architecture with the control method.

Table 9 EfficientNetB0 Classification Report - Direct Method

Clase	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.90	0.92	0.91
Common Rust	0.98	0.97	0.98
Gray Leaf Spot	0.84	0.81	0.82
Healthy	0.99	1.00	1.00

Table 10 shows the detailed performance of the EfficientNetB0 architecture with the progressive transfer method. Unlike the direct transfer method, there is a slight improvement in the classification of the 'Gray_Leaf_Spot' class and a decrease in the 'Blight' class with an accuracy of 0.88.

Table 10. EfficientNetB0 Classification Report - Progressive Method

Clase	Precision	Recall	F1-score
Blight	0.88	0.92	0.90
Common Rust	0.99	0.97	0.98
Gray Leaf Spot	0.85	0.82	0.83
Healthy	1.00	1.00	1.00

3.4 Confusion matrix with blind testing

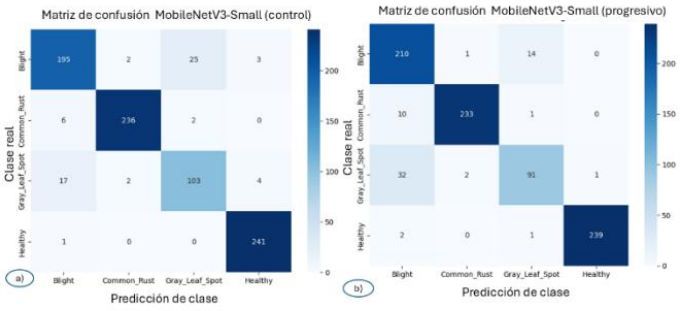


Figure 6. MobileNetV3-Small architecture confusion matrix, (a) direct transfer, (b) progressive transfer.

For the confusion matrix in Figure 6, the model is misclassifying the classes 'Gray_Leaf_Spot' and 'Blight', but it is in the progressive method where higher numbers are shown.

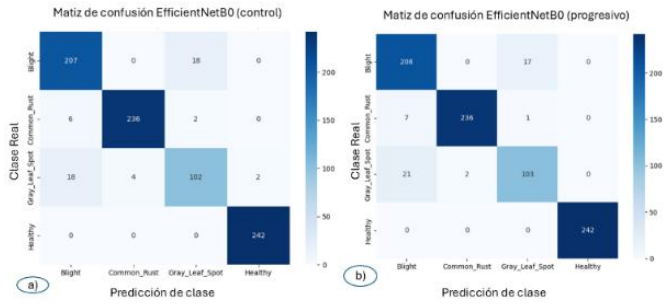


Figura 7. EfficientNetB0 architecture confusion matrix, (a) direct transfer, (b) progressive transfer.

For the confusion matrix shown in Figure 7, the EfficientNetB0 architecture appears to have low rates of class confusion, with both the control method and the progressive method confusing the classes "Gray_Leaf_Spot" and "Blight."

4. CONCLUSIONS

This research compared the effectiveness of two lightweight architectures (EfficientNetB0 and MobileNetV3-Small) and two transfer learning strategies (Direct vs. Progressive) for the classification of diseases in corn leaves.The main finding is that the choice of architecture is a more decisive factor than the training strategy. EfficientNetB0 proved to be the superior architecture. Although its average accuracy (93.85% in cross-validation) was only marginally higher than that of MobileNetV3-Small (93.47%), its key advantage lies in its statistical robustness. EfficientNetB0 exhibited a significantly lower standard deviation (±0.71% vs. ±1.11%), indicating more consistent and predictable performance, a critical attribute for deployment in practical applications. In terms of training methodology, progressive transfer (using PlantVillage as an intermediate domain) did not offer tangible benefits. Contrary to the initial hypothesis, it resulted in marginally lower performance and does not justify the considerable additional computational and time costs. A persistent challenge identified in all models was the recurring confusion between the 'Gray_Leaf_Spot' and 'Blight' classes, suggesting a high visual similarity in the symptoms of these diseases in the dataset. This is a limitation of the study, along with the use of images taken under controlled conditions.

5. REFERENCES

[1] Mwaza E, Khakata E, Kofi I. Maize Disease Detection Using Convolutional Neural Network. E3S Web of Conferences, vol. 469, EDP Sciences; 2023. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346900015.

[2] Zhou H, Su Y, Chen J, Li J, Ma L, Liu X, et al. Maize Leaf Disease Recognition Based on Improved Convolutional Neural Network ShuffleNetV2. Plants 2024, Vol 13, Page 1621 2024;13:1621. https://doi.org/10.3390/PLANTS13121621.

[3] El Sakka M, Ivanovici M, Chaari L, Mothe J. A Review of CNN Applications in Smart Agriculture Using Multimodal Data. Sensors 2025, Vol 25, Page 472 2025;25:472. https://doi.org/10.3390/S25020472.

[4] Wang S, Xu D, Liang H, Bai Y, Li X, Zhou J, et al. Advances in Deep Learning Applications for Plant Disease and Pest Detection: A Review. Remote Sens (Basel) 2025;17:698. https://doi.org/10.3390/RS17040698/S1.

[5] Kumar B, Ninoria SZ, Vishnoi VK. Maize disease detection through CNN using leaf images : A review. Advances in Science, Engineering and Technology 2025:214–8. https://doi.org/10.1201/9781003641544-39.

[6] Rachmad A. Convolutional neural network-based classification model of corn leaf disease. Mathematical Modelling of Engineering Problems 2023;10:530–6.

[7] Adhinata FD, Wahyono, Sumiharto R. A comprehensive survey on weed and crop classification using machine learning and deep learning. Artificial Intelligence in Agriculture 2024;13:45–63. https://doi.org/10.1016/J.AIIA.2024.06.005.

[8] Howard AG, Zhu M, Chen B, Kalenichenko D, Wang W, Weyand T, et al. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications 2017.

[9] Tan M, Le Q V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks 2019:6105–14.

[10] Sasank Chilamkurthy. Transfer Learning for Computer Vision Tutorial 2017. https://docs.pytorch.org/tutorials/beginner/transfer_learning_tutorial.html (accessed November 10, 2025).

[11] Petru P. What Is Transfer Learning in Computer Vision? 2023. https://blog.roboflow.com/what-is-transfer-learning/ (accessed November 10, 2025).

[12] Iman M, Miller JA, Rasheed K, Branch RM, Arabnia HR. Expanse: A deep continual/progressive learning system for deep transfer learning. University of Georgia, 2022.

[13] Smaranjit Ghose. Corn or Maize Leaf Disease Dataset2020.https://www.kaggle.com/datasets/smaranjitghose/corn-or-maize-leaf-disease-dataset (accessed November 10, 2025).

[14] Abdallah ALI. PlantVillage Dataset 2019. https://www.kaggle.com/datasets/abdallahalidev/plantvillage-dataset (accessed November 10, 2025).

[15] Howard A, Sandler M, Chu G, Chen L-C, Chen B, Tan M, et al. Searching for MobileNetV3 2019:1314–24.

[16] Zhang P, Yang L, Li D. EfficientNet-B4-Ranger: A novel method for greenhouse cucumber disease recognition under natural complex environment. Comput Electron Agric 2020;176:105652. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105652.

[17] Stone M. Cross-Validatory Choice and Assessmentof Statistical Predictions. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological) 1974;36:111–33. https://doi.org/10.1111/J.25176161.1974.TB00994.X.

Early morphometric response of potato inoculated with Rhizobium sp. ACO-34A under saline stress: a sustainable biofertilization approach

Sarmiento Megchum, Erick Fabián* Solís Zebadúa, Stephanie* Rincón Rosales, Reiner* Rincón Molina, Clara Ivette* Manzano Gómez, Luis Alberto* Maldonado Gómez, Julio César*

**Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050*
(e-mail: M19270426@tuxtla.tecnm.mx, M19270398@tuxtla.tecnm.mx, reiner.rr@tuxtla.tecnm.mx, clara.rm@tuxtla.tecnm.mx, D14270281@tuxtla.tecnm.mx, D07270254@tuxtla.tecnm.mx).

Abstract: Potato (*Solanum tuberosum* L.) is one of the most important staple crops worldwide, although its productivity is constrained by salt stress, which reduces plant growth and development. To address this challenge, the use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) represents a sustainable alternative to enhance tolerance and yield in agricultural systems. In this study, the effect of inoculation with *Rhizobium* sp. ACO-34A was evaluated in potato var. Fianna plants established in a greenhouse and subjected to different NaCl concentrations. The experimental design was factorial 2 × 5 (with or without inoculation × 0.0, 42.4, 65.7, 88.8, and 109.5 mM NaCl), with 14 replicates per treatment. Plants were grown in 2 L pots containing sandy loam substrate. Tubers were inoculated by immersion in a bacterial suspension (OD600 = 1.0) prior to planting, and a complementary biofertilization was applied 15 days after sowing (das). At 20–24 das, morphometric variables were recorded: stem length, leaf number, and stem diameter. Results showed that inoculation with *Rhizobium* sp. ACO-34A significantly increased stem length and leaf number compared with non-inoculated treatments ($p < 0.05$). Across treatments, early morphometric responses ranged from 10.71 ± 4.37 to 14.96 ± 2.79 cm in stem length, from 41.57 ± 17.27 to 62.07 ± 16.23 leaves per plant, and from 0.34 ± 0.09 to 0.45 ± 0.07 cm in stem diameter (mean ± standard deviation), which is consistent with the moderate effect of salinity and with growth-promotion mechanisms described in the literature for PGPR, such as phytohormone production and the modulation of stress-related antioxidant enzymes. In contrast, salinity had a restrictive effect on stem diameter, indicating that high salt concentrations limit cell expansion and structural thickening. These findings demonstrate that *Rhizobium* sp. ACO-34A has the ability to improve the initial growth of potato under salt stress and highlight its potential as a biofertilizer in agrobiotechnological strategies aimed at agricultural sustainability. Therefore, the integration of elite native strains such as ACO-34A into management practices could represent a valuable approach to mitigate the negative effects of salinity and contribute to more resilient and productive potato cropping systems.

Keywords: Agricultural sustainability, Biofertilization, Early growth, PGPR.

1. INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo básico de gran importancia alimentaria y económica, pero altamente sensible al estrés salino, que limita su productividad al inducir desequilibrios iónicos, estrés osmótico y oxidativo, afectando directamente el crecimiento y el rendimiento (FAO, 2025; Kazimierczak et al., 2019). En México, más del 50 % del territorio presenta características áridas o semiáridas y el 64 % de los suelos están afectados por salinización, lo que agrava esta problemática (SADER, 2021). Desde el marco de la biotecnología agrícola, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) representan una estrategia sostenible para mitigar la salinidad mediante producción de fitohormonas, regulación del etileno, solubilización de nutrientes y activación de defensas antioxidantes (Mishra et al., 2021). Además, su capacidad de formar biopelículas y colonizar de manera efectiva la rizósfera favorece una interacción estable con las raíces, incrementando la disponibilidad de nutrientes y mejorando la tolerancia al estrés abiótico (Jaiswal et al., 2021). En particular, *Rhizobium* sp. ACO-34A, aislada de *Agave americana*, ha demostrado tolerancia a NaCl, producción de auxinas, solubilización de fósforo y efectos positivos en distintos cultivos (De la Torre-Ruiz et al., 2016; García-Pérez et al., 2024). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de diferentes concentraciones de NaCl sobre parámetros morfométricos tempranos en plantas de *Solanum tuberosum* L. var. Fianna inoculadas con la cepa *Rhizobium* sp. ACO-34A.

2. METODOLOGÍA

2.1. Obtención del material biológico

Para este trabajo se emplearon tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Fianna por ser una de las variedades de papa más empleadas en México, con calibres de 20 mm de diámetro en estado fisiológico de brotación múltiple. La cepa élite nativa *Rhizobium* sp. ACO-34A, fue obtenida de la colección de cepas del laboratorio 1 de Ecología Genómica y Agricultura Regenerativa (TECNM/ITTG) y reactivada en

medio YEM suplementado con Ca^{2+} a temperatura ambiente (22 °C) bajo agitación orbital (140 rpm, 24 h).

2.2. Descripción del sitio experimental

El ensayo se realizó en condiciones de invernadero, perteneciente al departamento hortícola del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, Metepec, Estado de México. Este invernadero se encuentra a una latitud de 19° 14' N, longitud de 99° 35' O y cuenta con una superficie de 405 m² y temperaturas promedio de 22 °C (Figura 1).

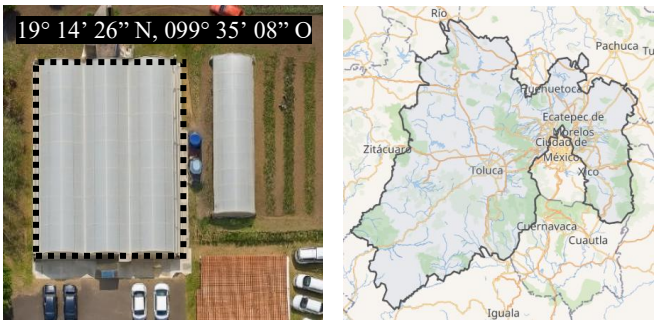


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio experimental.

2.3 Establecimiento de las plantas en invernadero y aplicación del estrés salino:

Se estableció un diseño factorial completo [2 x 5] teniendo como factores, A: Cepa élite rizobiana y B: concentración de NaCl lo que dio un total de 10 tratamientos (Tabla 1) evaluado a 14 réplicas, esto distribuido en un diseño completamente aleatorizado. Cada experimento se realizó en macetas de plástico de 2 L, utilizando 1 kg de sustrato compuesto por 50 % de tepojal y 50 % de suelo franco-arenoso proveniente de una cama de siembra del invernadero utilizado previamente analizado bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y desinfectado con un fungicida sistémico comercial Previcur® Energy. Para los tratamientos sometidos a salinidad se establecieron cinco niveles de salinidad con concentraciones de 0.00, 42.4, 65.7, 88.8, 109.5 mM correspondientes a conductividades eléctricas en solución con agua corriente de 0.39, 4.78, 6.41, 8.95 y 10.23 dS/m. Para los tratamientos con aplicación de la cepa rizobiana, los tubérculos se inocularon mediante inmersión en una suspensión de *Rhizobium* sp. ACO-34A con DO_{600nm}= 1.0. La siembra se realizó con una densidad de un tubérculo por maceta para todos los tratamientos, a una profundidad de 3-5 cm. El riego se realizó de acuerdo a la capacidad de campo del sustrato adecuado para papa (70%) con 500 ml de agua corriente cada 4 días y fertirriego cada 8 días con fertilizante soluble triple 19 enriquecido con micronutrientes Poly-Feed™; se protegió el cultivo de manera foliar aplicando fungicida sistémico Tecto® 60. Se aplicó una primera biofertilización con la cepa rizobiana a los 15 días después de la siembra usando un volumen de 10 ml por maceta (DO_{600nm}= 1.0) (Sánchez-Bernal et al., 2008; Flores López, López Delgado & Sotelo Ruiz, 2024).

Tabla 1. Tratamientos del diseño experimental evaluado.

Tratamiento	Combinación
1	A_1B_1: ACO-34A y 0.00 mM NaCl (+)
2	A_1B_2: ACO-34A y 42.4 mM NaCl
3	A_1B_3: ACO-34A y 65.7 mM NaCl
4	A_1B_4: ACO-34A y 88.8 mM NaCl
5	A_1B_5: ACO-34A y 109.5 mM NaCl
6	A_2B_1: S/INOCULACIÓN y 0.00 mM NaCl (-)
7	A_2B_2: S/INOCULACIÓN y 42.4 mM NaCl
8	A_2B_3: S/INOCULACIÓN y 65.7 mM NaCl
9	A_2B_4: S/INOCULACIÓN y 88.8 mM NaCl
10	A_2B_5: S/INOCULACIÓN y 109.5 mM NaCl

2.4 Determinación de parámetros morfométricos.

Se evaluaron variables morfométricas como longitud y diámetro del tallo 20 días después de la siembra (dds), así como el número total de hojas por planta 24 dds, cuyas mediciones constituyen indicadores tempranos del vigor vegetativo y permiten analizar la influencia de la inoculación y la salinidad en el crecimiento inicial del cultivo.

2.5 Análisis estadístico.

A partir de los datos obtenidos se realizó un ANOVA (α= 0,05; $P \leq 0.05$), usando el software de Sistema de Análisis Estadístico STATGRAPHICS Centurion versión XVI.I

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El suelo analizado mostró textura areno-franca, pH ligeramente alcalino (7.50), y baja densidad aparente (0.87 g/cm³) (Tabla 2), condiciones que mejoran la infiltración, reducen el riesgo de compactación y favorecen el movimiento de agua y solutos, por su parte los valores elevados de la capacidad de intercambio catiónico indican alta capacidad para retener cationes como K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}, esenciales para la homeostasis iónica en cultivos sensibles a la salinidad (Brady & Weil, 2016). El alto contenido de fósforo disponible (122 ppm) y nitrógeno total (0.65 %) coloca al suelo dentro de la categoría de alta fertilidad, lo cual contrasta con estudios de papa bajo suelos de menor calidad, donde la respuesta a la inoculación microbiana se ve enmascarada por limitaciones nutricionales. Además, la presencia de materia orgánica (3.33 %) y carbono orgánico (1.93 %) sugiere un ambiente edáfico con buena capacidad de amortiguamiento, condición que puede potenciar la acción de las PGPR al mejorar la disponibilidad de microelementos y facilitar la colonización rizosférica mediante la formación de biopelículas (Sánchez-Bernal et al., 2008; Jaiswal et al., 2021; Ghidawi et al., 2024). Por tanto, la caracterización del suelo realizada evidenció condiciones óptimas de fertilidad y estructura, aunado a ello, la fertilización realizada durante el ciclo de cultivo con una fórmula balanceada (triple 19 con micronutrientes) permitió

reforzar la disponibilidad de nutrientes y mantener un adecuado soporte nutricional en cultivos de papa (Koch et al., 2020), lo que permite inferir que las respuestas observadas en la planta se atribuyen principalmente a efectos de la inoculación y al estrés salino, y no posibles deficiencias de nutrientes en el medio edáfico. Estas propiedades convierten al sustrato en un modelo adecuado con potencial para mantener la productividad en cultivos exigentes como papa (Flores López, López Delgado & Sotelo Ruiz, 2024).

Tabla 2. Análisis de propiedades físicoquímicas y de fertilidad del suelo.

Parámetro	Resultado	Unidad	Interpretación
pH (1:2 suelo/agua)	7.50	U. pH	Medianamente alcalino
Textura	84 arena, 8 limo, 8 arcilla	%	Areno-franco
Densidad aparente	0.87	g/cm³	Suelos orgánicos, buena porosidad
Materia orgánica	3.33	%	Alta
Carbono orgánico	1.93	%	Adecuado
Nitrógeno total	0.65	%	Alto
Fósforo disponible (P_2O_5)	122.03	ppm	Muy alto
Potasio (K)	2956.10	ppm	Muy alto
Calcio (Ca)	3119.86	ppm	Muy alto
Magnesio (Mg)	2928.00	ppm	Muy alto
Sodio (Na)	337.90	ppm	Medio
Capacidad intercambio catiónico (CIC)	48.68	meq/100 g	Alta

En la longitud de tallo (20 dds), el ANOVA mostró efectos significativos del factor inoculación ($p = 0.0443$) y de la interacción inoculación × salinidad ($p = 0.0168$) (Tabla 3).

De manera complementaria, en la Tabla 4 se presentan las medias y desviaciones estándar de la longitud del tallo, número de hojas y diámetro de tallo para cada combinación de inoculación y salinidad. La longitud del tallo osciló aproximadamente entre 10.71 ± 4.37 y 14.96 ± 2.79 cm, el número de hojas entre 41.57 ± 17.27 y 62.07 ± 16.23, y el diámetro de tallo entre 0.34 ± 0.09 y 0.45 ± 0.07 cm.

Estos valores cuantitativos permiten visualizar de manera clara las diferencias en las medias de los parámetros morfométricos entre tratamientos y sintetizar la respuesta morfométrica temprana del cultivo frente al arreglo factorial evaluado.

Tabla 3. Análisis de varianza de las variables longitud de tallo, número de hojas y diámetro de tallo

Variable	Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Longitud de tallo	Cepa (A)	70.0071	1	70.0071	4.13	**0.0443**
	Salinidad (B)	44.0036	1	44.0036	2.59	0.1098
	A × B	99.6036	1	99.6036	5.87	**0.0168**
	(BB)	5.87755	1	5.87755	0.35	0.5571
	Error total	2068.81	122	16.9574		
	Total (Corr.)	2498.54	139			
Número de hojas	Cepa (A)	2452.83	1	2452.83	7.28	**0.0079**
	Salinidad (B)	932.575	1	932.575	2.77	0.0986
	A × B	1272.89	1	1272.89	3.78	0.0542
	(BB)	3.49235	1	3.49235	0.01	0.919
	Error total	41079.6	122	336.718		
	Total (Corr.)	49021.9	139			
Diámetro de tallo	Cepa (A)	0.03457	1	0.034571	3.31	0.0711
	Salinidad (B)	0.06603	1	0.066036	6.33	**0.0132**
	A × B	0.03889	1	0.038893	3.73	0.0558
	(BB)	0.00206	1	0.002066	0.2	0.657
	Error total	1.27243	122	0.01043		
	Total (Corr.)	1.57171	139			

Tabla 4. Medias de parámetros morfométricos tempranos evaluados en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L. var Fianna)

Tratamiento	Longitud de tallo (cm)	Número de hojas	Diámetro de tallo (cm)
T1: A_1B_1	14.82 ± 2.61	60.86 ± 8.57	0.44 ± 0.06
T2: A_1B_2	14.96 ± 2.79	62.07 ± 16.23	0.45 ± 0.07
T3: A_1B_3	12.71 ± 5.39	50.86 ± 21.67	0.36 ± 0.13
T4: A_1B_4	11.82 ± 4.18	51.79 ± 19.66	0.39 ± 0.14
T5: A_1B_5	11.43 ± 4.38	46.21 ± 21.80	0.34 ± 0.10
T6: A_2B_1	11.93 ± 4.38	48.07 ± 17.99	0.37 ± 0.09
T7: A_2B_2	11.21 ± 4.37	42.43 ± 20.83	0.36 ± 0.10
T8: A_2B_3	10.71 ± 4.37	41.57 ± 17.27	0.36 ± 0.08
T9: A_2B_4	12.57 ± 4.80	54.07 ± 19.43	0.39 ± 0.13
T10: A_2B_5	12.25 ± 3.44	43.79 ± 12.82	0.34 ± 0.09

La gráfica de interacción (Figura 2) evidencia que las plantas inoculadas alcanzaron mayor elongación, especialmente en ausencia de estrés y en concentraciones moderadas de NaCl, mientras que en niveles altos de salinidad ambas líneas de tendencia (inoculadas y no inoculadas) tienden a converger. Este patrón sugiere que la cepa *Rhizobium* sp. ACO-34A contribuye a la elongación temprana del tallo, con una respuesta modulada por el nivel de NaCl aplicado. Estudios previos han demostrado que PGPR productoras de auxinas y citoquininas favorecen la división y expansión celular bajo condiciones salinas, prolongando el crecimiento vegetativo inicial (Mishra et al., 2021). En papa, la inoculación con *Bacillus mojavensis* mejoró la altura de planta y biomasa aérea bajo NaCl, en asociación con una mayor actividad antioxidante y un balance hormonal más favorable (Ghidawi et al., 2024).

En conjunto, estos antecedentes indican que el comportamiento observado en este trabajo es consistente con el marco general de regulación hormonal y antioxidante mediada por PGPR bajo estrés salino.

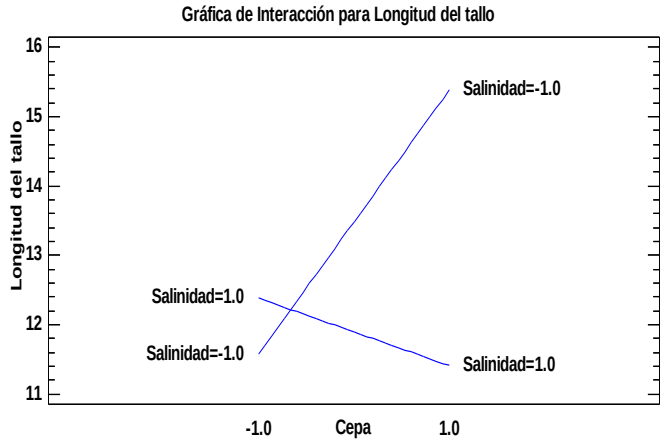


Figura 2. Gráfico de interacción para la variable de respuesta longitud de tallo

En el número de hojas (20 dds), la inoculación fue significativa ($p = 0.0079$), mientras que la interacción mostró una tendencia marginal ($p = 0.0542$). En la gráfica de interacción (Figura 3) se observa que las plantas inoculadas mantuvieron una ventaja en la formación foliar en casi todos los niveles de NaCl, aunque la brecha se redujo en condiciones de mayor salinidad. Este comportamiento indica que la inoculación con *Rhizobium* sp. ACO-34A favorece el desarrollo temprano de la parte foliar de la planta, incrementando el área fotosintética disponible, en concordancia con lo reportado para otras PGPR. Una mayor producción de hojas en etapas tempranas es fundamental para sostener la fotosíntesis y acumular reservas necesarias para el llenado de tubérculos. En otros cultivos como tomate, la inoculación con *Pseudomonas fluorescens* reguló positivamente genes asociados al desarrollo foliar y tolerancia a estrés (Hanifah et al., 2023). En papa, este tipo de respuesta puede asociarse con la mejora en la relación K^+/Na^+ en los tejidos, lo que permite conservar la integridad celular y retrasar la clorosis foliar (Tahir et al., 2019).

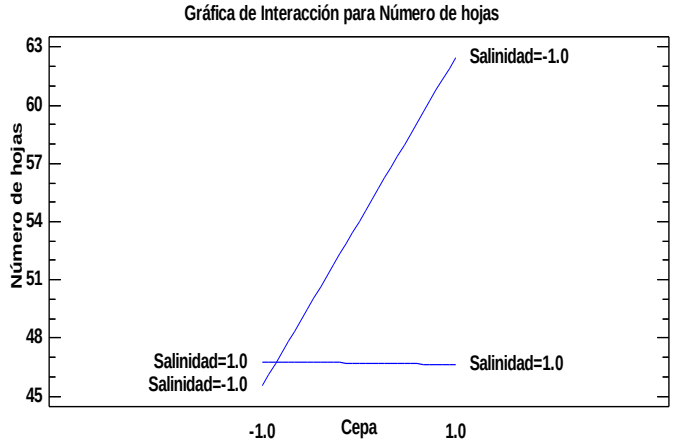


Figura 3. Gráfico de interacción para la variable de respuesta número de hojas

El diámetro de tallo (24 dds) mostró diferencias significativas únicamente por el efecto de la salinidad ($p = 0.0132$). La gráfica de interacción (Figura 4) confirma que, a medida que aumenta la concentración de NaCl, el grosor del tallo disminuye en ambos tratamientos, con diferencias mínimas entre inoculados y no inoculados. Este resultado sugiere que el engrosamiento del tallo es un proceso estructural más tardío, dependiente de la deposición de celulosa y lignina, así como de la expansión radial de células, procesos que son altamente afectados por la acumulación de Na^+ (Shahid et al., 2024). Estudios en papa cv. Alpha evidencian que el aumento de salinidad reduce progresivamente el diámetro del tallo, aun en presencia de fertilización química (Sánchez-Bernal et al., 2008), lo que coincide con los hallazgos de este trabajo.

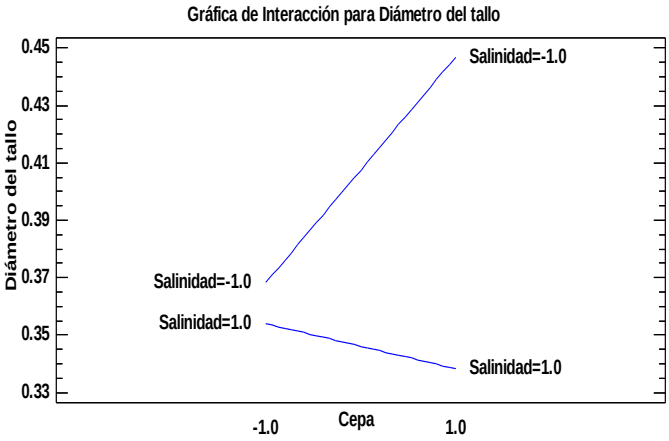


Figura 4. Gráfico de interacción para la variable de respuesta diámetro de tallo

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el suelo utilizado presentó una fertilidad elevada y condiciones fisicoquímicas favorables, por lo que las respuestas observadas en la papa se atribuyen principalmente a la interacción entre la inoculación y la salinidad. La inoculación con *Rhizobium* sp. ACO-34A favoreció significativamente la elongación del tallo y la emisión de hojas, especialmente en condiciones de baja y moderada salinidad, mientras que el diámetro de tallo estuvo determinado sobre todo por el nivel de salinidad, con una reducción progresiva a medida que aumentó la concentración de NaCl y solo una tendencia positiva atribuible a la inoculación. En conjunto, estos resultados indican que la cepa ACO-34A promueve el crecimiento vegetativo inicial de la papa en escenarios de estrés salino bajo a moderado, aunque su eficacia es limitada frente a condiciones de salinidad severa; este patrón es coherente con los ajustes hormonales y otros procesos de respuesta al estrés que se han atribuido a las PGPR en la literatura y respalda el potencial de *Rhizobium* sp. ACO-34A como componente de estrategias de biofertilización sostenible en sistemas de cultivo de papa afectados por salinidad. Desde una perspectiva aplicada, estos hallazgos justifican avanzar hacia ensayos de campo con *Rhizobium* sp. ACO-34A en suelos con problemas de salinidad y explorar su desempeño en esquemas de rotación con otros cultivos sensibles a las sales, como paso gradual hacia su posible

integración en programas locales de manejo biológico de la salinidad.

REFERENCIAS

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.

De La Torre-Ruiz, N., Ruiz Valdiviezo, V. M., Rincón Molina, C. I., Rodríguez Mendiola, M., Arias Castro, C., Gutiérrez Miceli, F. A., ... & Rincón Rosales, R. (2016). Effect of plant growth-promoting bacteria on the growth and fructan production of Agave americana L. Brazilian Journal of Microbiology, 47, 587-596. https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.010

FAO (2025). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Base de datos estadísticos de FAOSTAT

Flores López, R., López Delgado, H. A., & Sotelo Ruiz, E. D. (2024). *Tubérculo – semilla de papa en invernadero*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

García-Pérez, L. G., Rincón-Molina, C. I., Martínez-Romero, E., Rogel, M. A., Tapia-Torres, Y., Manzano-Gómez, L. A., Maldonado-Gómez, J. C., Rincón-Molina, F. A., & Rincón-Rosales, R. (2024). Genomic insights and plant growth-promoting potential of rhizobial strains from *Agave americana*. Horticulturae, 10(12), 1370. https://doi.org/10.3390/horticulturae10121370

Ghidawi, J. S, Ghazala, I., Haddar, A., Bouazizi, O., Gargouri Bouzid, R., & Nouri Ellouz, O. (2024). Effect of the Plant Growth-Promoting Bacteria Strain *Bacillus mojavensis* I4 on Potato Growth, Physiology, Tuber Yield, and Quality Under Salt Stress Conditions. *Potato Research*, 1-23. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3883973/v1

Hanifah, N. A. S. binti, Ghadamgahi, F., Ghosh, S., Ortiz, R., Whisson, S. C., Vetukuri, R. R., & Kalyandurg, P. B. (2023). Comparative transcriptome profiling provides insights into the growth promotion activity of *Pseudomonas fluorescens* strain SLU99 in tomato and potato plants. Frontiers in Plant Science, 14, 1141692. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1141692

Jaiswal, S. K., Mohammed, M., Ibny, F. Y., & Dakora, F. D. (2021). Rhizobia as a source of plant growth-promoting molecules: potential applications and possible operational mechanisms. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 619676. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.619676

Kazimierczak, R., Średnicka-Tober, D., Hallmann, E., Kopczyńska, K., & Zarzyńska, K. (2019). The impact of organic vs. conventional agricultural practices on selected quality features of eight potato cultivars. Agronomy, 9(12), 799. https://doi.org/10.3390/agronomy9120799

Koch, M., Judd, A., Gutsch, A., & Paul, J.-Y. (2020). The importance of nutrient management for potato (Solanum tuberosum L.). *Potato Research*, 63, 135–152. https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2

Mishra, P., Mishra, J., & Arora, N. K. (2021). Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants: Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research, 252,* 126861. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126861

SADER. (2021). *Mapa agrícola de afectación por salinidad en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/mapa-agricola-de-afectacion-por-salinidad-en-mexico

Sánchez-Bernal, E., Ortega Escobar, M., González Hernández, V., Camacho Escobar, M., & Kohashi Shibata, J. (2008).

Earthtics, Prototype Design with Npk Sensor for Measuring Nutrients and Soil Parameters.

Vela Peraza Andrea Guadalupe, Alpuche Bote Edgar Ediel, Lopez May Carlos Humberto

Instituto Tecnológico De Conkal, Yucatán. Calle 10 S/N, C.P 97345. {L21800136, L21800133, carlos.lm}@conkal.tecnm.mx

Abstract: This article presents the design, development, and validation of EARTHTICS, an innovative wireless environmental data acquisition system for real-time monitoring of essential soil parameters. The main objective was to create an accessible and cost-effective solution for measuring soil moisture, temperature, pH, electrical conductivity, and nutrient levels (nitrogen, phosphorus, and potassium). The system integrates IoT architecture with LoRa communication technology, enabling reliable data transmission over distances up to 4 kilometers without internet dependency. A user-friendly mobile application was developed to visualize, interpret, and export data directly to Excel format, supporting informed decision-making in agriculture. The methodology followed a structured, mutiphase approach, incuding initial research and sensor selection, hardware prototyping and software development, and field testing with iterative optimization. Sensor calibration was performed using standard laboratory methods to ensure measurement accuracy. Field evaluations demonstrated robust system performance, with successful multi-parameter data acquisition and seamless long-range communication. The results confirm that EARTHTICS provides a scalable solution for precision agriculture, contributing to sustainable resource management by optimizing water and fertilizer use. Currently at Technology Readiness Level 6, the system shows strong potential for commercial adoption, with future work focusing on enhanced sensor durability and integration of predictive analytics.

Keywords: Environmental data acquisition system, real-time monitoring, LoRa communication, Precision Agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

La salud del suelo es un factor determinante para la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental a nivel global (FAO, 2021). Los desequilibrios nutricionales en el suelo, particularmente en los macronutrientes esenciales Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), constituyen uno de los principales desafíos para los agricultores, ya que pueden derivar en rendimientos reducidos, degradación de la calidad del producto e impactos ecológicos adversos.

Los métodos tradicionales de análisis de suelo, aunque precisos, suelen ser costosos, requieren de un proceso destructivo y de laboratorio que consume tiempo, y son inaccesibles para muchos agricultores de pequeña escala, limitando así la capacidad de tomar decisiones oportunas y basadas en datos. Esta brecha tecnológica resalta la necesidad de desarrollar herramientas asequibles y accesibles para el monitoreo continuo.

En los últimos años, la integración de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura ha abierto nuevas vías para el monitoreo ambiental en tiempo real. Los sistemas capaces de medir parámetros del suelo de manera continua e inalámbrica pueden proporcionar información valiosa sobre las condiciones del suelo, permitiendo prácticas de agricultura de precisión que optimizan el uso de agua, fertilizantes y pesticidas.

El objetivo de este trabajo es demostrar que es posible desarrollar un sistema integral de adquisición de datos que, mediante la integración de sensores NPK asequibles, una arquitectura IoT y comunicación LoRa, pueda proporcionar un monitoreo confiable, en tiempo real y multiparamétrico del suelo, ofreciendo así una solución práctica y escalable para la agricultura de precisión en zonas con infraestructura limitada.

Teniendo igual el objetivo final, de apoyar a los agricultores, técnicos y campesinos, en la gestión sostenible de sus recursos, así como contribuyendo a la seguridad alimentaria.

Fig. 1. Encuesta a productores, técnicos e ingenieros agrónomos.

1.1 Antecedentes y Estado del Arte.

Las soluciones actuales en el mercado para el monitoreo del suelo incluyen dataloggers y sistemas basados en sensores, pero estos a menudo miden solo dos o tres parámetros (por ejemplo, temperatura y humedad) y requieren conexiones por cable o acceso a internet. Ejemplos como el Extech Data Logger o el X-gree-sensor están limitados en funcionalidad, escalabilidad y accesibilidad, particularmente en zonas rurales.

EARTHTICS se diferencia al medir hasta siete parámetros de forma inalámbrica, almacenar datos en formato Excel a través de una aplicación móvil y operar sin necesidad de conectividad a internet. Esta innovación llena un vacío en el mercado de herramientas integrales, de bajo costo y fáciles de usar para el monitoreo de la salud del suelo.

Además de las limitaciones técnicas, la alta inversión requerida para adquirir sistemas comerciales de monitoreo representa una barrera económica infranqueable para una gran mayoría de agricultores, especialmente los de pequeña escala y en países en desarrollo. Este alto costo impide la adopción generalizada de tecnologías que podrían optimizar sus recursos y mejorar su productividad, perpetuando métodos ineficientes.

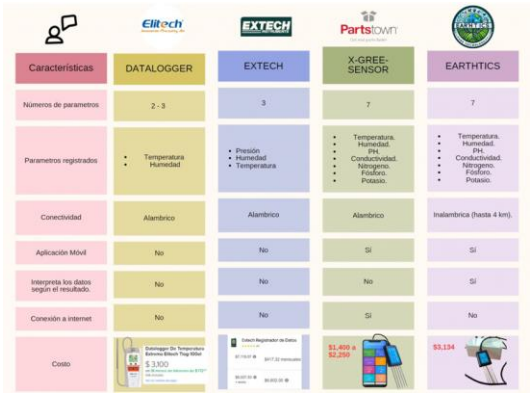


Fig. 2. Diferenciadores de proyectos similares.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del sistema EARTHTICS siguió un enfoque estructurado en siete fases:

2.1 Investigación.

Se realizó un estudio preliminar mediante encuestas y entrevistas con agricultores e ingenieros agrónomos para identificar las necesidades del usuario y los requisitos técnicos.

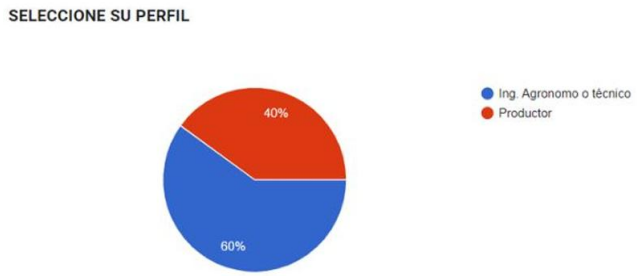


Fig. 3. Encuesta del perfil.

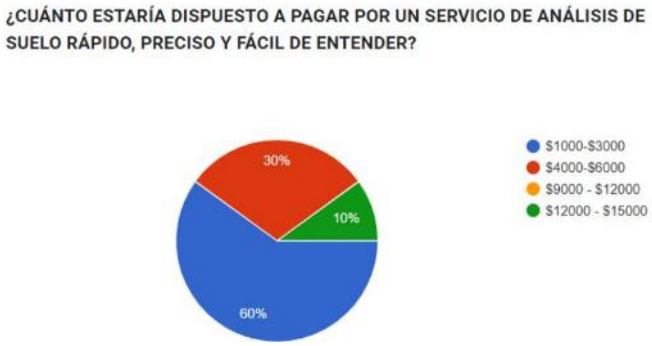


Fig. 4. Encuesta de presupuesto.

2.2 Selección del sensor.

Con base a la investigación, se seleccionaron sensores considerando su precisión, rango de medición, consumo energético y costo. Los componentes clave incluyen:

- Sensor NPK JXCT-IoT
- Sensor de humedad y temperatura del suelo
- Sensor de pH y conductividad eléctrica
- Módulo LoRa para comunicación inalámbrica
- Microcontrolador (ESP32)

2.3 Diseño de placa.

Se diseño la placa mediante un proceso donde se imprime y se limpia, para posteriormente llegar al resultado final.

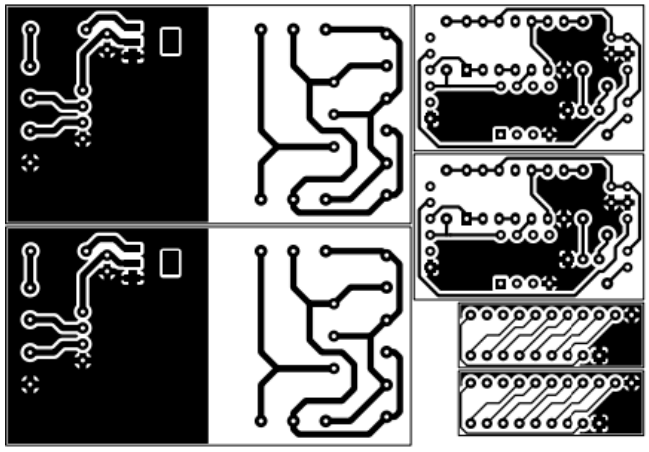


Fig. 5. Diseño de la placa.

2.4 Programación

La comunicación del sensor es hexadecimal, por lo que se tuvo que realizar un programa para poder estar mandando y recibiendo datos en tiempo real.

Read

E.g., Read Humidity, temperature, conductivity, PH, N, P, K together:

Master sends

Address	Function Code	Start Address (Hi)	Start Address (Lo)	Number of Points (Hi)	Number of Points (Lo)	Error Check (Lo)	Error Check (Hi)
0x01	0x03	0x00	0x00	0x00	0x07	0x04	0x08

Sensor responds:

Address	Function Code	Number of byte	humidity	temperature	conductivity	PH	N	P	K	Error Check (Lo)	Error Check (Hi)
0x01	0x03	0x0E	0x01 0xD0	0x01 0x4C	0x00 0x2C	0x00 0x5A	0x00 0x20	0x00 0x58	0x00 0x68	0x70	0x29

Fig. 6. Comunicación con el sensor.

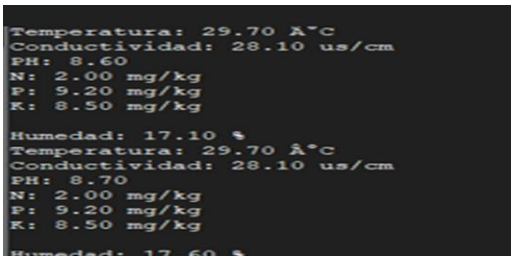


Fig. 7. Recolección de los parámetros

2.5 Desarrollo y Pruebas.

El hardware fue ensamblado e integrado con una aplicación móvil de desarrollo propio. La calibración de los sensores se realizó utilizando métodos estándar de laboratorio para garantizar la precisión de las mediciones. Las pruebas de campo se llevaron a cabo en parcelas agrícolas para evaluar el rendimiento del sistema en condiciones reales.

2.6 Optimización.

Con base en los resultados de las pruebas de campo, se realizaron ajustes tanto en el hardware como en el software para mejorar la confiabilidad, la duración de la batería y la capacidad de respuesta de la interfaz de usuario.

2.7 Recolección y Análisis de Datos.

Los datos de los sensores se transmiten vía LoRa a una pasarela (gateway), donde son procesados y almacenados. La aplicación móvil permite a los usuarios visualizar tendencias, establecer alertas y exportar datos para su posterior análisis. Se integraron herramientas estadísticas para ayudar a identificar patrones y apoyar las decisiones agronómicas.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSION´

El prototipo EARTHTICS demostró un desempeño robusto en la medición simultánea de los siete parámetros objetivo. Las pruebas de campo validadas mediante métodos de calibración estandarizados confirmaron una precisión satisfactoria en las lecturas. La comunicación LoRa se mantuvo estable en distancias de hasta 4 km, superando las limitaciones de conectividad en áreas rurales, un hallazgo que coincide con lo reportado por Mekki et al. (2019) sobre la eficacia de LoRaWAN en aplicaciones agropecuarias.

Ante todo, esto, se realizaron diferentes pruebas en distintos lugares. Una de ellas se llevó a cabo el 11 de marzo de 2025 en la escuela secundaria técnica de Acanceh, Yucatán. Las pruebas se realizaron con el grupo de la especialidad de agronomía y consistieron en mediciones en cuatro puntos dentro de un invernadero que la escuela posee. El suelo de este invernadero, utilizado por generaciones de estudiantes, proporcionó un entorno de prueba consistente para las mediciones.

Fig. 8. Prueba en Acanceh, Yucatán.

Además de realizar pruebas dentro del invernadero, se hizo fuera de este. Donde los resultados obtenidos en el invernadero de la escuela secundaria técnica de Acanceh revelaron condiciones de suelo relativamente estables en temperatura (25.7 - 29.7 °C) y humedad (17.1 - 17.6 %). Sin embargo, se detectaron variaciones significativas en los niveles de NPK y conductividad eléctrica (EC) en comparación con el suelo externo afectado por un incendio.

Específicamente, el área externa presentó un rango extremadamente amplio y elevado de Fósforo (P) (hasta 191 mg/kg) y Potasio (K) (hasta 184 mg/kg), lo que sugiere una alteración profunda de la composición mineralógica y orgánica del suelo post-incendio, un fenómeno documentado por Certini (2021). Por el contrario, los valores dentro del invernadero, aunque variables, se mantuvieron dentro de rangos más típicos para suelos agrícolas en producción.

La capacidad del sistema para capturar estas diferencias subraya su utilidad para diagnosticar estados de salud del suelo y eventos disruptivos. La interfaz de la aplicación móvil fue calificada como intuitiva por los usuarios finales, facilitando la visualización y exportación de datos para su análisis, lo que se alinea con la necesidad de herramientas de soporte a la decisión fáciles de usar (Wolfert et al., 2021).

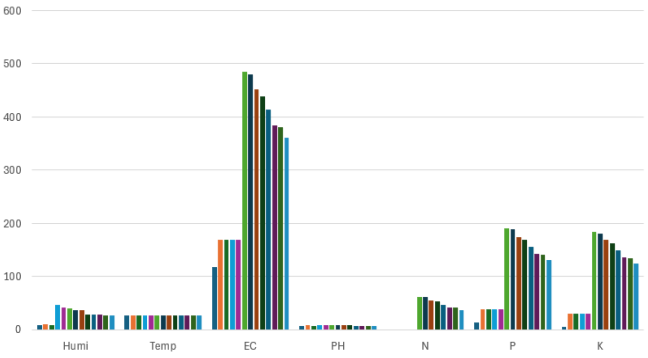


Fig. 9. Comparación de datos fuera de invernadero.

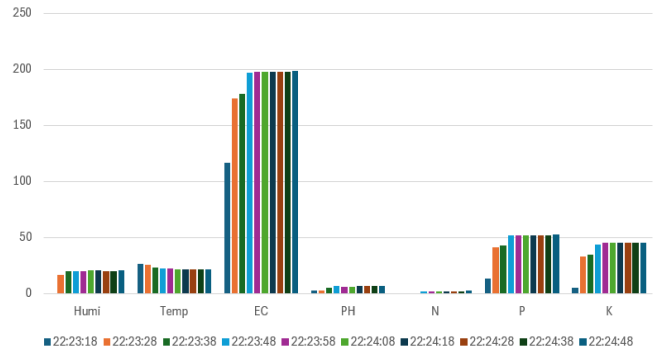


Fig. 10. Comparación de datos adentro de invernadero.

Parámetros	**Muestreo dentro**	**Muestreo fuera**
Temperatura (°c)	25.7 – 29.7	26.7 – 27.2
Humedad (%)	17.1 – 17.6	8.5 – 46.7
Conductividad (us/cm)	28.1	117- 485
pH	0.6 – 8.7	6.5 – 8.1
Nitrógeno (N)	2.00 mg/kg	0- 62 mg/kg
Fósforo (P)	9.20 mg/kg	0- 191 mg/kg
Potasio (k)	8.5 – 9.5 mg/kg	5- 184 mg/kg

Fig. 11. Cuadro comparativo con los diferentes datos obtenidos.

3.1 Ventaja Comparativa

En comparación con las soluciones existentes, EARTHTICS ofrece:

- Detección multiparamétrica (7+ variables)
- Operación inalámbrica de largo alcance
- Independencia de internet
- Menor costo (precio objetivo: $2,200 MXN)
- Integración con Excel para análisis de datos

Estas características lo hacen particularmente adecuado para agricultores de pequeña y mediana escala en regiones con infraestructura tecnológica limitada.

3.2 Implicaciones para la Agricultura Sostenible

Al permitir un monitoreo preciso de las condiciones del suelo, el sistema ayuda a reducir el uso excesivo de agua y fertilizantes, minimiza el impacto ambiental y favorece mayores rendimientos de los cultivos. Esto se alinea con los objetivos globales de agricultura sostenible y seguridad alimentaria.

4. CONCLUSIONES

El sistema EARTHTICS representa un avance significativo en la tecnología agrícola, al combinar IoT, comunicación inalámbrica y diseño centrado en el usuario para abordar desafíos críticos en el manejo del suelo.

El prototipo ha alcanzado un TRL 6, demostrando su preparación para una implementación más amplia. Los trabajos futuros se centrarán en escalar la producción, mejorar la durabilidad de los sensores e integrar aprendizaje automático para análisis predictivos.

Este proyecto destaca el potencial de las soluciones tecnológicas de bajo costo y alta tecnología para transformar las prácticas agrícolas tradicionales, promover la sostenibilidad y mejorar los medios de vida en las comunidades agrícolas.

REFERENCIAS

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2020). Precision agriculture and sustainability. Precision Agriculture, 21(4), 1-24. Recuperado de: https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-020-09709-3

Certini, G. (2021). Effects of fire on properties of forest soils: A review. Oecologia, 143(1), 1-10. Recuperado de: https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-021-05035-1

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (s.f.) Instrumentos de Gestión del Agua. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/instrumentos-de-gestion-del-agua (Consultado: 13 junio 2024).

CONAHCYT (s.f.) Anexo Nivel de Madurez Tecnológica. Disponible en: https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/sni/marco_legal/criterios/Anexo_Nivel_de_Madurez_Tecnologica.pdf (Consultado: 13 junio 2024).

FAO. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Recuperado de: https://www.fao.org/3/cb9910en/cb9910en.pdf

Google Shopping (s.f.) Extech Registrador de Datos. Disponible en: https://www.google.com/shopping/product/3175909386441696277/offers?q=dispositivos+que+registran+parametros+ambientales (Consultado: 13 junio 2024).

IEEE. (2022). IEEE Internet of Things Journal: Special Issue on IoT for Agriculture. Recuperado de: https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6488907

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) (s.f.) Sitio web oficial. Disponible en: https://www.impi.gob.mx (Consultado: 13 junio 2024).

Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR) (s.f.) Sitio web oficial. Disponible en: https://www.indautor.gob.mx (Consultado: 13 junio 2024).

JALTEC (s.f.) Guía para la Evaluación del Nivel de Maduración Tecnológica (TRL). Disponible en: https://innovaciones.jaltec.mx/wp-content/uploads/2022/02/Guía-de-evaluación-maduración-tecnológica.pdf (Consultado: 13 junio 2024).

Newark México (2023) Wireless - LoRa Technology. Disponible en: https://mexico.newark.com/wireless-lora-technology (Consultado: 13 junio 2024).

Renke. (2025, September 30). Soil NPK Sensor for Soil nutrients in agriculture - Renke. Environment Monitoring Sensors Manufacturer. https://www.renkeer.com/product/soil-npk-sensor/

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (2025) ¿Qué hacemos? Datos Junio 2025. Disponible en: https://www.gob.mx/agricultura/que-hacemos (Consultado: 22 de octubre 2025).

Environmental Sustainability-Agronomic Indicators of Indoor Crops in Urban Agriculture

Jorge Flores Velázquez*, Francisco García Herrera*

**Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Posgrado en Hidrociencias, Texcoco Estado de México, México, jorgelv@colpos.mx.*

Abstract Since the beginning of the 21st century, agriculture in general has undergone technological modifications in its production systems, primarily for edible crops. The innovation stemming from protected cultivation has been urban agriculture: green walls, vertical gardens and farms, and indoor and outdoor plant factories with artificial lighting have moved from concept to implementation. The objective of this work was to analyze the advantages and challenges of integrating urban biosystems as a sustainable alternative for producing low-growing crops. A system known as the Artificial Lighting Plant Factory (H-PFAL) was constructed with the idea that it could be implemented in offices and homes. Between 2024 and 2025, four cycles of lettuce and arugula were cultivated under the conditions of an office plant factory, allowing for the estimation of water and energy efficiency indicators. Results show energy consumption of 96 and 72 kWh, which translates to an energy cost per plant of 6.14 pesos for lettuce and 1.84 pesos for arugula. Average yields of 2.8 kg per m² were obtained with a light intensity of 220 micromoles and 1.54 kg per m² when the light intensity was 170 micromoles for lettuce, highlighting the importance of light intensity in this type of biosystem.

Keywords: Technological Innovation, Resilient Cities, Water Security, Horticulture

1. INTRODUCCION

El desarrollo de tecnologías en el sector agrícola impacta no solo en la producción de cultivos si no en el uso eficiente de los recursos. Resaltan investigaciones sobre consumo energético, desafíos técnicos, como la eficiencia lumínica, comparación de sistemas productivos, aunque sigue siendo incipiente en México. Trabajos como el de **Cai** et al. (2024) evalua consumo energético en PFAL y estrategias de ahorro, incluyendo optimización de iluminación y sistemas de aire acondicionado (HVAC), con reducción de hasta 45 % y 50 % respectivamente. Propone integrar inteligencia artificial (IA), energías renovables y materiales eficientes para mejorar la viabilidad económica y ambiental de las PFAL

Lork et al. (2020) utiliza control inteligente del ciclo de iluminación para cultivar lechuga, logrando hasta un 52 % de ahorro energético y aumento del área foliar mediante algoritmos evolutivos. Estudios como el de Chiba University (**Chiba**, 2020) utilizan simulaciones ópticas tridimensionales para optimizar distribución de PPFD, logrando uniformidad en el dosel del cultivo y mayor eficiencia en el uso de luz LED (**Angenent, 2004)**.

Palacios y Velásquez (2023) discuten tecnologías PFAL, destacando retos en eficiencia energética e hídrica y el uso de energías renovables, recirculación de agua y control del fotoperiodo con iluminación LED (azul ~460 nm y rojo ~660 nm). **Guillen** (2024) compara sistemas de producción agrícola en campo, invernadero y PFAL, analizando costos, productividad y rentabilidad; concluye ventajas potenciales de PFAL aunque destaca su alta inversión inicial (Graamans, 2018).

A pesar de los resultados logrados en diferentes latitudes que exponen las bondades de sistemas urbanos de interior e interior, en México ha sido nulo principalmente en la explotación de biosistemas como fábricas de plantas (HPFAL) pero en general sobre producción y consumo de productos vegetales como microgreens, lechuga hidropónica en sistemas verticales o producción urbana controlada. Quizá debido a dificultades sean desarrollo tecnológico en hardware y software, el uso de Plataformas inteligentes de control (hardware y software), la Automación y uso de sensores para monitoreo y control de CO_2, humedad, temperatura, pH y EC, riego hidropónico (**Leyva**-Ovalle, 2018), la ventilación y las luces LED.

Otras áreas de oportunidad que está creciendo a nivel de investigación es la simulación de procesos. El modelado digital en dos y tres dimensiones para el control energético, o para la simulación de operaciones (Ohyama, 2000; Kozai 2016). La mecatrónica es otra área que se explora a nivel de investigación buscando insertar la robótica en el control de sensores y actuadores, la simulación virtual y la implementación de algoritmos de control avanzados con enfoques de optimización.

En general el hardware básico que se esta utilizando en México es: Arduino, PLCs, sensores (CO_2, humedad, pH, temperatura, EC), visualización PC y cámaras CCTV. Software de control: interfaces gráficas (middleware, Web UI), control inteligente

(controladores PID, MPC, reinforcement learning) integrados con sensores y actuadores. IoT en la agricultura 4.0, que implica conectividad inalámbrica, análisis de datos, agentes autónomos y manufactura holónica como guías conceptuales (Ban, 2022).

En general se pude comentar que los desarrollos tecnológicos en México tanto en hardware como software se encuentran a nivel de investigación en instituciones relacionadas con la agronomía, mecatrónica, electrónica o ingeniería en sistemas. El incipiente desarrollo que han tenido esta basado en los costos eléctricos que impactan directamente sobre los el desarrollo de las PFAL (Bassu, 2025).

El objetivo de este trabajo fue analizar ventajas y retos en la integración de biosistemas urbanos como alternativa sustentable de producción de cultivos de porte bajo.

1.1 Indicadores de la productividad del agua en fábricas de plantas con luz artificial

De acuerdo con **Kozai** (2013), los indicadores de la productividad del agua son la eficiencia en el uso del agua (WUE), la eficiencia en el uso del agua transpirada (TWUE), la productividad del agua (WP), la eficiencia agronómica del agua (AWUE), el Balance Hídrico o índice de recirculación (R), la productividad del agua por unidad de área (WUE área), entre otras.

A. Eficiencia en el uso del agua (WUE, Water Use Efficiency)

La eficiencia en el uso del agua se puede calcular con la siguiente expresión (Kozai, 2020).

$$WUE = \frac{W_c + W_p}{W_S} = \frac{W_S + W_L}{W_S} \quad (1)$$

Donde Wc es la masa (o peso) de agua recolectada en el panel de enfriamiento del acondicionador de aire para reciclar (kg m^{-2} h^{-1}); W_S es la masa de agua irrigada (o suministrada) a la PFAL (kg m^{-2} h^{-1}); W_L es la masa de vapor de agua perdida hacia el exterior por permeación de aire a través de pequeños huecos en la entrada/salida y paredes (kg m^{-2} h^{-1})

$$W_L = V_A N \frac{X_{in} + X_{out}}{F} \quad (2)$$

Donde N, es el número de cambios de aire por hora en el cuarto de cultivo (h-1); VA es el volumen de aire en el cuarto de cultivo (m3); F es la superficie construida en el cuarto de cultivo (m2); y Xin y Xout son, respectivamente, la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire que contiene vapor de agua dentro y fuera del cuarto de cultivo (kg m-3). Generalmente no se drena el agua residual líquida desde el cuarto de cultivo hacia el exterior. Si existe alguna, debe agregarse como una variable en el lado derecho de la ecuación (1).

En la segunda ecuación (2) se asume que Xin en el tiempo t es el mismo que en el tiempo (t+δt) donde δ es la estimación que se suma al lado V_A intervalo de tiempo. Por lo que el término $\frac{X_{in}(t) - X_{in}(t+\delta)\ V_A}{\delta t}$ derecho de la ecuación (2), el valor es despreciablemente pequeño en la mayoría de los casos. En un caso particular donde Xout cambia con el tiempo durante el intervalo de tiempo de estimación, el valor pequeño en la mayoría de los casos. En un caso donde Xout cambia con el tiempo de estimación el valor promedio se usa en la ecuación (2).

De manera simplificada La eficiencia en el uso del agua (WUE) se puede calcular como ecuación 3:

$$\text{WUE} = \frac{\text{Biomasa producida (kg)}}{\text{Agua utilizada (m}^3\text{)}} \quad (3)$$

B. Eficiencia en el uso del agua transpirada (TWUE).

Esta eficiencia mide solo el agua que la planta realmente utiliza (no incluye pérdidas por evaporación, fugas o drenajes). Requiere mediciones detalladas de transpiración puede ser estimada con ecuación 4.

$$\text{TWUE} = \frac{\text{Biomasa seca (kg)}}{\text{Agua transpirada (m}^3\text{)}} \quad (4)$$

C. Productividad del agua (WP).

También puede expresarse en términos económicos de acuerdo con ecuación 5

$$\text{WP (\$)} = \frac{\text{Valor del Rendimiento (\$)}}{\text{Agua aplicada (m}^3\text{)}} \quad (5)$$

D. Productividad del agua por unidad de área ($WUE_{área}$).

La investigación de **Rai** et al. (2017), muestra que valores recomendados para los indicadores de productividad del agua son: **WUE** (kg/m³ o g/L) un valor mínimo de ≥ 40 kg/m³ (g/L), su rango óptimo se localiza entre 50–70 (hasta 75 g/L); no reporta valores para WP($/m³), pero indica que debe ser proporcional a mejorar el WUE. Cuando la mejora sea ≥ 20 % frente a los datos de cultivos de campo; el **WUE**_área (g/m²·día) debe tener valores mayor a ≥ 20 g/m²·día por capa (0.040 kg/L), el rango óptimo se localiza en un rango ≥ 60–80 g/m²·día total (0.060 a 0.080 kg/L). La Eficiencia Energética (**EUE**, g fresco/kWh), debe tener valores de EUE≥ 20–30 g/kWh, el rango óptimo se encuentra en el rango EUE_l ≥0.005–0.01. El valor teórico propuesto es aproximadamente 0.04.

Puede ser estimada con la ecuación 6

$$\text{WUE}_{\text{area}} = \frac{\text{Rendimiento (kg/m}^2\text{)}}{\text{Agua utilizada (L/m}^2\text{)}} \quad (6)$$

E. Eficiencia Energética (EE)

La eficiencia energética en agricultura y en particular en sistemas controlados como invernaderos o cultivos hidropónicos, se calcula comparando la cantidad de producción obtenida con la energía utilizada para lograrla.

El rendimiento del sistema NFT, respecto a la energía que consume se puede expresar con la ecuacioun 7:

$$\text{Eficiencia Energética} = \frac{\text{Producción útil (biomasa,kg)}}{\text{Energía consumida (MJ o kWh)}} \quad (7)$$

También se podrá expresar como se indica en la ecuación 8

$$\text{EE}\left(\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}\right) \text{ ó EE}(\%) = \frac{\text{Energía contenida en el producto}}{\text{Energía total consumida}} \times 100 \quad (8)$$

El cálculo de la energía contenida (MJ) es distinto para los cultivos sembrados, la lechuga contiene aproximadamente 1.6 MJ/kg de energía calórica (valor promedio para vegetales de hoja) y la arúgula 1.05 MJ/kg de energía calórica. Un factor de conversión promedio para calcular la Energía Consumida (MJ/m²) que puede utilizarse es: 1 kWh = 3.6 MJ.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyo un biosistema modular, el cual es susceptible de ser escalada al nivel deseado ideal para ser instalado en una oficina o cocina en un ambiente doméstico. Con el fin de ser manipulado desde el piso, se subdivide en 4 niveles separados por 0.43m de distancia vertical, dos módulos destinados al cultivo de arúgula variedad Wild Rocket (Eruca vesicaria) y dos módulos para el cultivo de lechuga variedad Mantequilla (Lactuca sativa var. capitata). El tamaño y distribución de los cultivos se muestra en la figura 1

La densidad de siembra (Np) fue de 56 plantas por metro cuadrado para la arúgula y 28 plantas por metro cuadrado de lechuga (Figura 1). Las canaletas utilizadas son hidropónicas de 0.08 x 0.06 x 0.75m (ancho x alto x largo) con perforaciones de 2” (0.05m) separadas a cada 0.125m.

Figura 1. Prototipo de la fábrica de plantas de oficina para producción de lechuga y arugula

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de obtener parámetros de referencia, se midió el consumo eléctrico (kWh por día) usando un Wattímetro HER-432 Steren y con ellos el costo asumiendo una tarifa de 1.02 pesos por Kw. Los resultados se muestran en el Tabla 1 y 2.

Tabla 1 Consumo eléctrico por tipo de subsistema en la HPFAL

Dispositivo	**Consumo (W)**	**Tiempo (h)**	**Consumo (kWh)**
Temporizador (T)	1.2	24.0	0.029
Bomba (B)	39.7	6.8	0.270
Lámparas (L)	260.9	12.0	3.131
Total (kWh por día)			**3.430**

Tabla 2 Costos por planta asumiendo el costo del Kwh en 1.02 pesos.

Cultivo	**días**	**kWh ciclo**	**Costo ($)**	**No Pl**	**Costo ($) por Planta**
Lechuga	28	96.03	97.88	16	6.12
Arúgula	21	72.02	73.41	40	1.84

Para el estimar el consumo y eficiencia energética, se introduce el concepto de energía contenida el cual depende de la especia; por ejemplo para este ejercicio se estima que la energía contenida (MJ) es distinto para los cultivos sembrados, la lechuga contiene aproximadamente 1.6 MJ/kg de energía calórica (valor promedio para vegetales de hoja) y la arúgula 1.05 MJ/kg de energía calórica. Se estima el factor de conversión promedio para calcular la Energía Consumida (MJ/m²) que puede utilizarse es: 1 kWh = 3.6 MJ. Con lo cual se estiman la eficiencia energética para Lechuga (Tabla 3) y arugula (Tabla 4) cultivado con dos intensidades de luz, 220 y 170 Micromoles.

Tabla 3. Cálculo de la eficiencia energética para la lechuga en la HPFAL

Lechuga T220	**Rend. kg/m²**	**Energía Consumida**		**Eficiencia Energética**	
		kWh/ m²	**MJ/ m²**	**(kg/ kWh)**	**(%)**
O-N 24	3.3	83.6	301.1	0.039	1.73
N-D 24	2.3	83.6	301.1	0.028	1.23
F-M 25	3.4	83.6	301.1	0.041	1.81
A-M 25	4.6	83.6	301.1	0.055	2.43
Lechuga T170	**Rend kg/m²**	**Energía Consumida**		**Eficiencia Energética**	
		kWh/ m²	**MJ/ m²**	**(kg/kWh)**	**(%)**
O-N 24	2.9	83.6	301.1	0.035	1.56

N-D 24	2.1	83.6	301.1	0.025	1.09
F-M 25	3.7	83.6	301.1	0.044	1.96
A-M 25	3.8	83.6	301.1	0.045	2.01

Tabla 4. Cálculo de la eficiencia energética para la Arúgula

Arúgula T220	**Rend kg/m²**	**Energía Consumida**		**Eficiencia Energética**	
		kWh/m²	**MJ/m²**	**kg/kWh**	**(%)**
O-N 24	2.4	62.7	225.8	0.038	1.11
N-D 24	1.9	62.7	225.8	0.030	0.87
F-M 25	3.9	62.7	225.8	0.063	1.83
A-M 25	3.0	62.7	225.8	0.049	1.42
Arúgula T170	**Rend kg/m²**	**Energía Consumida**		**Eficiencia Energética**	
		kWh/m²	**MJ/m²**	**kg/kWh**	**%**
O-N 24	1.9	62.7	225.8	0.030	0.89
N-D 24	1.6	62.7	225.8	0.026	0.76
F-M 25	3.1	62.7	225.8	0.050	1.46
A-M 25	2.5	62.7	225.8	0.040	1.17

En cuanto a la eficiencia hídrica, se usaron las relaciones expuestas en la metodología y con ello se estimaron los valores expuestos en los Tablas 5 para el cultivo de lechuga y Tabla 6 para el cultivo de arugula, de igual manera con dos intensidades de luz.

Tabla 5. Eficiencia en el uso del agua para lechuga

Lechuga T220	**PF g/pl**	**Vol. (m³)**	**WUE (kg/m³)**	**WP ($/m³)**	**Rend. (Kg/m²)**	**WUE_Agua (kg/L)**
O-N 24	116.44	0.017	54.37	2856	3.26	0.055
N-D 24	82.84	0.015	42.58	3144	2.32	0.043
F-M 25	121.80	0.019	49.52	2487	3.41	0.049
A-M 25	163.10	0.025	51.50	1931	4.56	0.052
Lechuga T170	**PF (g)/planta**	**Vol. (m³)**	**WUE (kg/m³)**	**WP ($/m³)**	**Rend. (Kg/m²)**	**WUE_Agua (kg/L)**
O-N 24	104.68	0.017	48.88	2856	2.93	0.049
N-D 24	73.30	0.015	37.67	3144	2.05	0.037
F-M 25	131.76	0.019	53.57	2487	3.683	0.053
A-M 25	135.10	0.025	42.66	1931	3.78	0.042

El uso de indicadores de eficiencia, permite visualizar la viabilidad o no, técnica, económica, ambiental etc en la implantación de biosistemas cerrados. Durante la actual investigación, se muestran datos duros medidos en 4 ciclos de producción (Octubre-Noviembre de 2024, Noviembre-Diciembre de 2024, Febrero-Marzo de 2025 y Abril-Mayo de 2025). Los datos tabulados indican que las posibilidades de producir cultivos tipo ensalada de hoja ancha y delgada, es económicamente viable y sobre todo, desde el punto de vista ambiental representa ventajas en el uso eficiente de recursos agua-energía, y cero residuos por drenaje.

En términos técnicos la caracterización de este tipo de biosistema, permanecen en rangos cualificados como sustentables con eficiencias en el uso de recursos que favorece su uso, tanto energético como hídrico. Un segundo paso seria con base en esta eficiencia energética, estimar la huella de carbono que permita analizar el grado de contaminación derivado del uso de lámparas artificiales, estas hipótesis fortalecen la idea de que el desarrollo de las plantas es adecuado en un ambiente de hogar u oficina, con ventajas como la reducción o eliminación de costo por control climático aunque también se exime la posibilidad de controlar las variables climáticas en en un momento puede incrementar el rendimiento del cultivo

Tabla 6. Eficiencia en el uso del agua para árugula

Arúgula T220	**PF (g)/pl**	**Vol. (m³)**	**WUE (kg/m³)**	**WP ($/m³)**	**Rend (Kg/m²)**	**WUE_Agua (kg/L)**
O-N 24	42.67|	0.017	49.81	2142.5	2.38	0.0400
N-D 24	33.50	0.015	43.04	2358.2	1.87	0.0346
F-M 25	70.34	0.019	71.49	1865.3	3.93	0.0575
A-M 25	54.45	0.025	42.98	1448.7	3.04	0.0345
Arúgula T170	**PF (g)/pl**	**Volum (m³)**	**WUE (kg/m³)**	**WP ($/m³)**	**Rend (Kg/m²)**	**WUE_Agua (kg/L)**
O-N 24	34.13	0.017	39.850	2142.5	1.91	0.0320
N-D 24	29.00	0.015	37.266	2358.2	1.62	0.0299
F-M 25	55.92	0.019	56.835	1865.3	3.13	0.0457
A-M 25	44.83	0.025	35.389	1448.7	2.51	0.0284

Por otro lado, resalta la posibilidad de alternar o intercalar diversos cultivos en un mismo biosistema, como en este caso fue la asociación de lechuga-arúgula con éxito, ya que su

desarrollo y producción compite con los rangos comerciales. Las eficiencias y rendimientos mostrados en los Tablas 3,4 5 y 6 permiten ver que una fábrica de plantas doméstica con luz artificial, es una buena propuesta para el consumo de vegetales frescos y con un reducido volumen. Lo anterior es sin duda un apoyo a la seguridad alimentaria en las ciudades que cada día requieren más recursos alimenticios y menos uso y/o desperdicio del recurso agua.

Un aspecto final es la compaginación de las herramientas informáticas actuales, aunado al uso de sensores inteligentes que se están desarrollado ad hoc a biosistemas de interior y en general en agricultura urbana. La generación de herramientas de software que permitan el monitoreo de una mini PFAL usando desarrollos tecnológicos comunes como Arduino y un lenguaje de alto nivel para la comunicación con el circuito eléctrico y el respaldo de la información donde las condiciones no permitan el uso adecuado y fluido de la red wifi y por lo tanto de la nube. En el presente trabajo se han implementado los programas necesarios que como herramientas facilitan el manejo y control de una minifabrica de plantas con el objetivo de seguir investigando y profundizando algunos temas de interés.

CONCLUSIONES

Con los promedios de los recursos usados en la producción de un consorcio de Lechuga (hoja ancha) y arugula (hoja delgada) en una fabrica de plantas con luces artificiales en una oficina, se probaron dos intensidades de luz y se obtuvieron resultados entre los promedios establecidos con las investigaciones realizadas en países con mayor tradición en este tipo de tecnologías. Los resultados obtenidos indican que los rendimientos obtenidos son competitivos a nivel global. Em cuento al uso de tecnologías para el monitoreo y control, ha sido suficientes variables climáticas y de la solución con sensores tipo Arduino y programación básica. Los consumos hídricos en estos biosistemas se reducen en mas del 80 por ciento fijando bases tecnológicas para la agricultura del futuro, que se infiere cero emisiones al ambiente.

4. REFERENCIAS

Angenent, L.T., Karim, K., Al-Dahhan, M.H., Wrenn, B.A., Domiguez-Espinosa, R., (2004). "Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater". Trends Biotechnol. 22, 477–485.

Ban B. (2022). Interfaz Mixed Reality para gemelo digital de plant factory. arXiv. or arXiv:2211.00597v1 **[cs.HC]** for this version) https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.00597

Bassu, S., Eichelsbacher, S., Giunta, F. *et al.* Positive impact of hydroponics and artificial light on yield and quality of wheat. *Sci Rep* 15, 30768 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-16204-0

Cai, W. et al. (2025). Energy consumption of plant factory with artificial light: Challenges and opportunities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 210, 115235 MDPI. ScienceDirect

Chiba Univ. et al. (2020). Evaluation of the Light Environment of a Plant Factory with Artificial Light by Using an Optical Simulation. Agronomy, 10(11):1663 MDPI.

Guillen P, V.M. (2024). Características y comparación de los sistemas. Prisma Tecnológico, 15(1), 3–9.

Graamans L., Baeza E., Dobbelsteen A., Tsafaras I., Stanghellini C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. Agricultural Systems. Volume 160, 2018. Pages 31-43, ISSN 0308-521X, https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003.

Kozai T. 2013. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 2013. Online ISSN 1349-2896, Print ISSN 0386-2208. https://doi.org/10.2183/pjab.89.447

Kozai T., Genhua Niu, Michiko Takagaki (2020) Plant Factory (Second Edition), Academic Press, PP 477-487, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.20001-0.

Kozai, Niu & Takagaki (2016) Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Academic Press, Elsevier. London, En. 432 pp

Leyva-Ovalle, QR. (2018) sistema eficiente para producción de lechuga (Lactuca sativa L.). (2018). *Agro Productividad*, *9*(6). https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/772

Lork, C. et al. (2020). Minimizing Electricity Cost through Smart Lighting Control for Indoor Plant Factories.

Ohyama, K., Yoshinaga, K., Kozai, T., 2000. Energy and mass balance of a closed-type transplant production system (Part 2): water balance. J. SHITA 12 (4), 217–224.

Palacios Duarte, J. E., & Velasquez Maldonado , D. Y. . (2022). Una Revisión: Tecnología y aplicación en las PFAL. *Avances Investigación En Ingeniería*, *19*(2 (Julio-Diciembre). https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.8263

Rai R.K., Singh V.P., Upadhyay A. 2017. Chapter 14 - Performance Evaluation of Irrigation Projects, Editor(s): Raveendra Kumar Rai, Vijay P. Singh, Alka Upadhyay. Planning and Evaluation of Irrigation Projects. Academic Press. Pages 425-466. ISBN 9780128117484 https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811748-4.00014-5.

From Productivity to Sustainability: Coffee Cluster Development in the Sierra Negra of Puebla

Villafuerte Palavicini, Faustino Sergio 1 *, Cruz Manzo, Jessica*, Guevara Ramírez, Iniria* Ruan Cervantes, José Luis*, Marín Beltrán, Magda Elizabeth*, Vázquez León, Lucio Abel**

** Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico SN, Tehuacán 75770, Mexico (e-mail: { faustinosergio.vp, jessica.cm, iniria.gr, joseluis.rc, magdaelizabet.mb }@tehuacan.tecnm.mx).*

*** SECHITI–Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico SN, Tehuacán 75770, Mexico (e-mail* lucio.vazquez@sechiti.mx *)*
mailto:joseluis.rc@tehuacan.tecnm.mx

Abstract: The coffee sector in the Sierra Negra of Puebla represents a strategic area with significant agroclimatic advantages, but its development has been limited by structural deficiencies such as low productivity, aging plantations, insufficient infrastructure, and weak organizational capacity. The main objective of this research is to design a competitive cluster model that strengthens the coffee value chain in the region, improves production efficiency, and promotes access to specialized markets under sustainable and inclusive principles. To achieve this, a mixed methodological approach was applied, combining quantitative and qualitative tools. A total of 50 surveys were conducted with small coffee producers, 15 semi-structured interviews were carried out with local transformers and community leaders, and field observations were performed in 20 family production units. Secondary statistical data were also analyzed with SPSS Statistics 20, and the results were integrated with participatory diagnoses. The findings reveal low yields compared to other coffee regions but also highlight a strong willingness among producers to join cooperatives, adopt agroecological practices, and pursue quality certifications. The analysis of the coffee value chain indicates that the highest added value is concentrated in the transformation and commercialization stages, where local producers currently have limited participation. Likewise, the application of Porter's Diamond model shows that, although favorable natural conditions exist, competitiveness is constrained by weak infrastructure and fragmented market access. The research advances point to the potential of collective strategies such as micro-roasters, collective brands, and certifications that would allow entry into specialty markets and even participation in international competitions such as the Cup of Excellence Mexico. In conclusion, the project demonstrates that the Sierra Negra coffee sector has the necessary social and productive conditions to evolve into a competitive and sustainable cluster that not only improves economic indicators but also strengthens cultural identity and rural development.

Keywords: Competitiveness, coffee cluster, rural development, sustainability, value chain.

1. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos agrícolas de mayor relevancia a nivel mundial, no solo por su valor económico, sino también por su impacto social y cultural en las comunidades rurales que lo producen (Ma'ruf et al., 2025; Moguel & Toledo, 1999). En México, la cafeticultura constituye una fuente esencial de empleo e ingresos para más de 500 mil familias, la mayoría de ellas asentadas en regiones montañosas caracterizadas por altos índices de marginación y rezago social (Secretaría De Agricultura Y Desarrollo Rural, 2022). El estado de Puebla ocupa el tercer lugar nacional en valor de producción de café, con un crecimiento del 72.6 % en los ciclos 2021–2023; sin embargo, la región de la Sierra Negra permanece rezagada frente a otras zonas productoras debido a limitaciones de infraestructura, acceso a financiamiento, capacitación técnica y vinculación con mercados especializados(AGRICULTURA Puebla, 2024). El problema estudiado se centra en el rezago productivo y competitivo de la cafeticultura en la Sierra Negra de Puebla, una región con alto potencial agroclimático, pero con limitaciones estructurales que restringen su integración en cadenas de valor globales y reducen la capacidad de los productores para generar ingresos sostenibles (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & Secretaría de Desarrollo Rural del Gobierno del Estado de Puebla (SDR), 2024). A diferencia de otras zonas cafetaleras del estado, la falta de organización productiva y de innovación tecnológica limita la competitividad de la región. Este estudio se aborda desde el marco teórico de los clústeres de competitividad (M. E. Porter, 1998), que plantea que la cooperación entre empresas e instituciones de un mismo territorio impulsa la innovación, la productividad y la inserción en mercados internacionales. Asimismo, se retoma el modelo de las cuatro hélices (Carayannis & Campbell, 2009; Etzkowitz & Leydesdorff, 2000), el cual integra la participación de productores, gobierno, academia y sociedad civil como agentes de cambio para dinamizar la innovación y

el desarrollo regional. La investigación se desarrolla porque es necesario transformar la cafeticultura de la Sierra Negra en un motor de desarrollo rural sostenible, capaz de equilibrar las dimensiones económicas, sociales y ambientales. Su relevancia radica en que no solo busca mejorar la competitividad del café poblano en mercados nacionales e internacionales, sino también preservar el patrimonio cultural de las comunidades productoras y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 1, 8, 9 y 10), para vincular la producción agrícola con la innovación y la inclusión social (United Nations, 2015). En este contexto, el objetivo general del presente estudio es diseñar las bases conceptuales y empíricas para un modelo de clúster competitivo que fortalezca la cadena de valor del café en la Sierra Negra de Puebla bajo principios de sostenibilidad e inclusión social.

1.1 Antecedentes y estado del arte

La cafeticultura mexicana enfrenta un contexto complejo caracterizado por la volatilidad de precios internacionales, la intermediación en la comercialización y la vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático (Escamilla-Prado et al., 2021; Jaffee, 2014). A ello se suman problemáticas estructurales como el envejecimiento de cafetales, el rezago tecnológico y la migración de jóvenes a zonas urbanas, factores que debilitan la continuidad productiva en comunidades rurales (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx, 2017).

En el caso de Puebla, regiones como la Sierra Norte han logrado posicionar cafés arábicos de calidad en mercados especializados gracias a procesos de tecnificación y certificación. Sin embargo, la Sierra Negra sigue rezagada en términos de infraestructura y acceso a financiamiento, lo que limita la incorporación de los pequeños productores en cadenas de valor competitivas (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & Secretaría de Desarrollo Rural del Gobierno del Estado de Puebla (SDR), 2024). La literatura internacional sobre cadenas globales de valor (Gereffi et al., 2005) y cafés de especialidad en América Latina (Bray & Neilson, 2017) demuestra que la organización productiva en esquemas de clúster o cooperativas permite reducir desigualdades en la distribución de beneficios, facilita la adopción de certificaciones de origen y promueve la innovación tecnológica. Desde el ámbito teórico, M. E. Porter (1998) destaca que los clústeres son mecanismos de competitividad territorial que integran empresas e instituciones en dinámicas de cooperación, mientras que Etzkowitz & Leydesdorff (2000) enfatizan el papel de la innovación bajo el modelo de las cuatro hélices, en el cual interactúan productores, academia, gobierno y sociedad civil.

En este marco, el proyecto del clúster de café en la Sierra Negra de Puebla representa un esfuerzo innovador que combina diagnóstico socioeconómico, planeación estratégica y transferencia tecnológica. Su propósito es transformar la región en un referente de sostenibilidad, competitividad e innovación, para responder a los desafíos locales e integrándose a tendencias globales que privilegian la producción sostenible y la inclusión social. Texto de la subsección.

2. METODOLOGÍA

El diseño del estudio se basó en un enfoque mixto que combina procedimientos cuantitativos y cualitativos, con el objetivo de elaborar un diagnóstico integral del sector cafetalero en la Sierra Negra de Puebla y generar las bases metodológicas para la conformación de un clúster especializado. La decisión de emplear esta estrategia responde a la necesidad de contar con un análisis que no solo registre los aspectos estadísticos de la producción, sino que también integre las percepciones sociales, culturales y organizativas de los productores. Para ello, se recopilaron datos de fuentes secundarias provenientes del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Secretaría de Desarrollo Rural (SDR) y la Organización Internacional del Café (ICO), los cuales proporcionaron información sobre superficie sembrada, rendimientos, valor económico de la producción y características socioeconómicas de los cafeticultores de la región. Estos datos fueron procesados mediante análisis estadístico descriptivo con el software SPSS Statistics 20, lo que permitió organizar la información, calcular frecuencias, porcentajes y promedios, y representar gráficamente las tendencias productivas del sector, esto asegura un manejo riguroso de la información cuantitativa. En paralelo, se llevó a cabo la recolección de datos primarios a través de entrevistas semiestructuradas y encuestas aplicadas a una muestra intencional de productores y transformadores de café. La selección de la muestra se basó en criterios de participación activa dentro de la cadena de valor y en la representatividad territorial de municipios clave como San Miguel Eloxochitlán, Zoquitlán y Coyomeapan. Este criterio buscó garantizar la inclusión de productores de pequeña escala, así como de aquellos involucrados en procesos de transformación y comercialización, con el propósito de obtener una visión integral y equilibrada de las dinámicas del sector. A la par, se empleó la observación directa en campo, lo que permitió registrar de manera sistemática las prácticas agrícolas, las técnicas de beneficio húmedo y seco, y las condiciones de infraestructura asociadas a los procesos productivos. La inclusión de estas técnicas respondió a la necesidad de complementar la información estadística con evidencia empírica de la realidad local. El análisis de los datos cualitativos se realizó mediante un proceso de codificación y análisis de contenido, donde se clasificaron las respuestas en categorías asociadas a los ejes de competitividad, sostenibilidad, innovación y organización comunitaria. La triangulación de esta información con los resultados cuantitativos procesados en SPSS permitió validar hallazgos y reforzar la confiabilidad del diagnóstico. De igual manera, se desarrolló un mapeo de actores de la cadena de valor del café, para identificar proveedores de insumos, productores, transformadores, distribuidores y consumidores finales, lo cual permitió reconocer los nodos estratégicos de la red, los cuellos de botella más frecuentes y las oportunidades de cooperación. Los datos fueron sistematizados en SPSS Statistics 20 para obtener distribuciones de frecuencia y análisis cruzados de variables socioeconómicas, mientras que el análisis cualitativo se realizó mediante codificación temática manual, garantizando triangulación entre fuentes y consistencia interpretativa. Finalmente, como parte de la metodología planificada, se incorporó el análisis del Diamante de M. Porter

(1990), el cual posibilitó examinar la interacción de factores como las condiciones de producción, la demanda de cafés diferenciados, los sectores relacionados y de apoyo, así como la estructura y rivalidad empresarial presentes en la región. Esta fase, aún en desarrollo, será complementada con auditorías tecnológicas e infraestructurales para identificar capacidades instaladas y necesidades de modernización en los procesos productivos y de transformación. La decisión de incluir estas herramientas analíticas responde a la necesidad de comprender a profundidad los determinantes de la competitividad territorial y de sustentar la propuesta del clúster con evidencia empírica. En este sentido, la metodología empleada asegura un abordaje integral que combina diagnóstico socioeconómico, procesamiento estadístico con SPSS Statistics 20 y análisis cualitativo, todo ello orientado a la construcción de un modelo de organización productiva que promueva innovación, sostenibilidad e inclusión social en la cafeticultura de la Sierra Negra **(Fig. 1)**.

Fig. 1. Proceso metodológico del estudio

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir del análisis documental y del diagnóstico participativo confirman que la cafeticultura en la Sierra Negra de Puebla presenta un potencial considerable para mejorar su competitividad, aunque enfrenta limitaciones estructurales que la mantienen por debajo de otras regiones productoras del estado. El procesamiento de información en SPSS Statistics 20 permitió observar que en los municipios de Zoquitlán, Coyomeapan y San Miguel Eloxochitlán los rendimientos promedio se ubican entre 4 y 6 quintales por hectárea, lo que contrasta con los 8 a 10 quintales reportados en la Sierra Norte de Puebla. Esta diferencia se explica principalmente por el envejecimiento de cafetales, la falta de inversión en tecnología y la ausencia de certificaciones que faciliten el acceso a mercados de mayor valor agregado. En el levantamiento de información primaria se aplicaron 50 encuestas a productores, 15 entrevistas semiestructuradas a transformadores y líderes comunitarios, y se realizaron observaciones en campo en 20 unidades de producción familiar, lo cual permitió captar tanto las condiciones técnicas como las percepciones sociales de los cafeticultores, esto priorizó a los pequeños productores que constituyen la base del sistema productivo regional. Los hallazgos muestran que el 72 % de los productores encuestados manifestó interés en integrarse a esquemas de organización colectiva, principalmente a través de cooperativas o asociaciones productivas, mientras que el 65 % reconoció la necesidad de acceder a procesos de capacitación en prácticas agroecológicas y certificaciones de calidad. Estos resultados reflejan una disposición favorable hacia la innovación y la cooperación comunitaria como mecanismos para fortalecer la competitividad. Asimismo, las entrevistas con transformadores y líderes comunitarios destacaron la importancia de mejorar la infraestructura local para el beneficio húmedo y seco, para señalar las limitaciones actuales obligan a vender café pergamino a precios bajos sin poder participar en etapas posteriores que concentran mayor rentabilidad. El análisis del Diamante de Porter (**Fig. 2**) permitió identificar fortalezas y debilidades clave de la cafeticultura en la Sierra Negra. En cuanto a las condiciones de los factores de producción, la región cuenta con suelos volcánicos fértiles y altitudes óptimas para el cultivo de café arábica, lo que otorga ventajas comparativas frente a otras zonas productoras. Sin embargo, la carencia de infraestructura moderna y la dificultad para acceder a créditos reducen la capacidad de expansión productiva. En las condiciones de la demanda se observa un mercado nacional e internacional cada vez más orientado hacia cafés de especialidad, orgánicos y de origen certificado, lo que constituye una oportunidad poco aprovechada en la región. En lo referente a los sectores relacionados y de apoyo, si bien se han establecido vínculos con instituciones académicas y programas estatales, la articulación con proveedores de insumos y servicios logísticos aun es débil. Finalmente, en la estrategia, estructura y rivalidad, predomina la producción en pequeña escala con escasa capacidad de negociación frente a los intermediarios, lo que pone de manifiesto la urgencia de promover esquemas de organización colectiva que fortalezcan la cohesión y la competitividad del sector. En términos cuantitativos, los municipios productores de la Sierra Negra registran rendimientos promedio de entre 4 y 6 quintales por hectárea, en contraste con los 9.2 quintales promedio nacional reportados por SIAP (2024). La superficie cultivada asciende a 2,100 hectáreas, de las cuales el 68 % corresponde a pequeños productores con menos de dos hectáreas de cultivo. Los precios de venta del café pergamino fluctúan entre 65 y 90 pesos por kilogramo, dependiendo de la calidad y del nivel de intermediación. Este diferencial evidencia la necesidad de fortalecer los eslabones de transformación y comercialización local. Respecto a los factores estocásticos, la competitividad del sector depende fuertemente de variables exógenas como las fluctuaciones del precio internacional del café arábica, que en el periodo 2020–2024 ha oscilado entre USD 1.60 y 2.40 por libra (ICO, 2024). A ello se suman los impactos del cambio climático, la variabilidad en precipitaciones (reducción promedio de 12 % en la última década, según CONAGUA, 2023) y la incidencia recurrente de la roya del cafeto, que ha provocado pérdidas de hasta 30 % en algunos ciclos productivos. Estas condiciones aleatorias refuerzan la necesidad de adoptar prácticas agroecológicas y esquemas de aseguramiento agrícola. El recorrido histórico de la cafeticultura en la Sierra Negra se remonta a mediados del siglo XX, cuando pequeños productores introdujeron variedades de *Coffea arabica* bajo sistemas tradicionales de sombra. Durante los años 1980–2000, la reducción de precios internacionales y la falta de infraestructura de beneficio provocaron una fuerte migración rural y abandono de cafetales. No fue sino hasta 2018 cuando el Gobierno del

Estado de Puebla, a través de la Secretaría de Desarrollo Rural (SDR), impulsó nuevamente la producción mediante el Programa Estatal de Renovación de Cafetales y la promoción de prácticas agroecológicas. En la actualidad, la política pública se alinea con estrategias nacionales como el Plan de Café Sustentable (SADER, 2022), que busca consolidar clústeres regionales de valor agregado. Desde la estrategia de gobierno, destacan los convenios de colaboración entre la SDR, el Tecnológico Nacional de México y SECIHTI, orientados a fortalecer la transferencia tecnológica, la capacitación de productores y la creación de marcas colectivas. Estas acciones institucionales funcionan como factores sistémicos dentro del diamante, incidiendo positivamente en las condiciones de la demanda y en los sectores de apoyo. De manera transversal, el análisis actualizado del diamante muestra que la competitividad del café en la Sierra Negra depende de la sinergia entre recursos naturales, infraestructura, innovación tecnológica y gobernanza institucional. Si bien el territorio posee ventajas comparativas —altitud, suelos volcánicos, microclimas estables—, su conversión en ventajas competitivas requiere políticas sostenidas, incentivos fiscales y una estrategia coordinada de certificación, trazabilidad y promoción comercial. Por lo tanto, el análisis del diamante de Porter confirma que la competitividad regional se encuentra más condicionada por variables institucionales y tecnológicas que por la disponibilidad de recursos naturales.

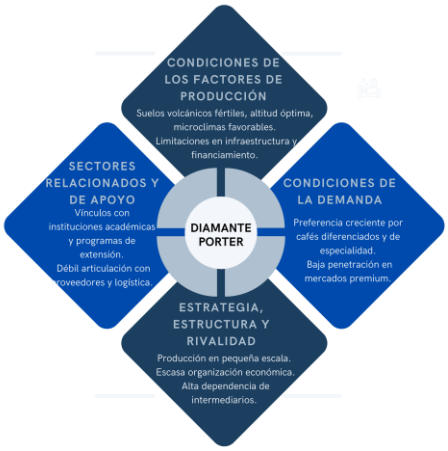


Fig. 2. Diamante de Porter aplicado a la cafeticultora de la Sierra Negra

El estudio de la cadena de valor del café (**Fig. 3**) evidenció que la mayor parte del valor agregado se concentra en las fases de transformación, tostado, empaque y comercialización, las cuales suelen realizarse fuera de las comunidades productoras. Los cafeticultores de la Sierra Negra participan principalmente en las etapas de cultivo y beneficio húmedo, con poca presencia en procesos posteriores que capturan mayores márgenes de ganancia. Este patrón coincide con lo señalado en la literatura sobre las desigualdades en la distribución de beneficios en cadenas agroalimentarias (Gereffi, Humphrey, & Sturgeon, 2005). Los escenarios analizados muestran que, al impulsar la instalación de micro tostadores comunitarios y el desarrollo de marcas colectivas, sería posible duplicar el margen de ganancia de los productores en un horizonte de tres a cinco años. A su vez, la incorporación de certificaciones como comercio justo u orgánico permitiría abrir nichos internacionales con precios diferenciados, lo que incrementa en al menos un 30 % los ingresos por venta de café.

Fig. 3. Cadena de valor del café en la Sierra Negra

Un aspecto clave identificado en este análisis es la posibilidad de acceder a premios de calidad que reconozcan la producción regional y fortalezcan su posicionamiento en mercados especializados. En particular, la Taza de Excelencia México (Cup of Excellence) se perfila como una meta estratégica, pues constituye el certamen más prestigioso del país y uno de los más reconocidos a nivel mundial. La participación en este concurso permitiría a los productores de la Sierra Negra validar la calidad de sus granos mediante procesos de catación profesional y, en caso de superar los 85 puntos, acceder a subastas internacionales donde el café puede alcanzar precios muy superiores al mercado convencional. Esta posibilidad no solo incrementaría la rentabilidad de los productores, sino que también reforzaría la identidad territorial del café poblano y consolidaría al clúster como un referente nacional de calidad e innovación en el sector. En conjunto, los resultados obtenidos reforzarían la pertinencia de consolidar un clúster cafetalero en la Sierra Negra como estrategia integral de desarrollo regional. El proyecto no solo contribuiría a mejorar los indicadores de productividad y competitividad, sino que también promovería la cohesión social, la preservación de prácticas culturales asociadas al café y la sostenibilidad ambiental. Desde una perspectiva estratégica, la aplicación del enfoque de clústeres de competitividad y del modelo de las cuatro hélices se vislumbra como un mecanismo viable para articular los esfuerzos de productores, academia, gobierno y sociedad civil, lo que alinea las necesidades locales con las tendencias globales de consumo responsable, certificación de calidad e innovación en el mercado cafetalero. A partir del diagnóstico socioeconómico, del análisis del diamante de Porter y de la cadena de valor del café, se definieron los componentes iniciales del modelo de clúster competitivo para la Sierra Negra de Puebla. Este modelo se encuentra en fase de construcción, pero sus fundamentos teóricos y estructurales ya se delinean a partir de los hallazgos obtenidos.

El modelo propone cuatro ejes estratégicos: **(1)** Fortalecimiento de las capacidades productivas mediante la renovación de cafetales, transferencia tecnológica y adopción de prácticas agroecológicas; **(2)** Creación de valor agregado local a través de microtostadores, certificaciones y marcas colectivas; **(3)** Gobernanza colaborativa basada en la articulación de productores, academia, gobierno y sociedad civil —siguiendo el enfoque de las cuatro hélices—; y **(4)** Proyección comercial y sostenibilidad, mediante estrategias de trazabilidad, comercio justo y promoción territorial del café poblano.

La Tabla 1 sintetiza los cuatro ejes estratégicos que estructuran el modelo preliminar de clúster competitivo para la Sierra Negra de Puebla. Cada eje articula acciones concretas orientadas a fortalecer la productividad, la agregación de valor, la gobernanza institucional y la sostenibilidad integral del sector cafetalero. Esta configuración busca generar sinergias entre actores locales y regionales, promoviendo un proceso de transformación productiva basado en la innovación, la cooperación y el aprovechamiento sustentable de los recursos territoriales. Los resultados esperados reflejan una transición progresiva desde un sistema tradicional de baja escala hacia un modelo integrado de competitividad y desarrollo rural sostenible.

Tabla 1. Ejes estratégicos del modelo de clúster competitivo de café en la Sierra Negra de Puebla

Eje estratégico	Acciones principales	Resultados esperados
1. Fortalecimiento de capacidades productivas	- Renovación de cafetales envejecidos mediante viveros locales. - Capacitación técnica en manejo agroecológico, control de plagas y cosecha selectiva. - Implementación de tecnologías apropiadas para el beneficio húmedo y seco.	- Incremento del rendimiento promedio por hectárea. - Mejora en la calidad del grano y reducción de pérdidas postcosecha. - Aumento de la eficiencia técnica de los pequeños productores.
2. Creación de valor agregado local	- Instalación de microtostadores comunitarios y centros de acopio certificados. - Desarrollo de marcas colectivas y sellos territoriales. - Participación en concursos y certificaciones (Comercio Justo, Orgánico, Cup of Excellence).	- Incremento del margen de ganancia del productor. - Diversificación de mercados nacionales e internacionales. - Posicionamiento del café de la Sierra Negra como producto de calidad diferenciada.
3. Gobernanza colaborativa y articulación institucional	- Integración de productores, academia, gobierno y sociedad civil bajo el enfoque de las cuatro hélices. - Creación de un consejo de gestión del clúster y mesas técnicas de innovación. - Establecimiento de convenios con organismos públicos y privados para transferencia tecnológica.	- Fortalecimiento de la cohesión social y la participación comunitaria. - Mejora de la coordinación interinstitucional y acceso a financiamiento. - Consolidación de una estructura organizativa sostenible.
4. Proyección comercial y sostenibilidad integral	- Implementación de estrategias de trazabilidad y marketing territorial. - Adopción de prácticas de economía circular en el manejo de residuos y subproductos del café. - Vinculación con redes internacionales de comercio ético y sostenible.	- Aumento del reconocimiento del café regional en mercados especializados. - Reducción del impacto ambiental en la producción. - Consolidación de un modelo de desarrollo ru

La estructura preliminar del modelo integra los determinantes de competitividad identificados en el Diamante de Porter —factores de producción, condiciones de demanda, sectores de apoyo y rivalidad empresarial— con los factores transversales de innovación, sostenibilidad y cohesión social. Este enfoque permitirá consolidar en etapas posteriores un esquema de gobernanza territorial que dé soporte al clúster y garantice su sostenibilidad en el tiempo.

4. CONCLUSIONES

Los avances alcanzados en la construcción del modelo de clúster competitivo para la Sierra Negra de Puebla demostraron que el trabajo realizado cumple con el objetivo general del estudio: establecer las bases conceptuales, empíricas y estratégicas necesarias para fortalecer la competitividad del sector cafetalero regional. La integración de los ejes estratégicos propuestos —capacitación productiva, generación de valor agregado local, gobernanza colaborativa y sostenibilidad comercial— confirma que el diagnóstico realizado no se limita a describir el contexto, sino que ofrece una estructura funcional sobre la cual se edifica el modelo. Estos resultados validan la pertinencia de aplicar el enfoque del Diamante de Porter y de las cuatro hélices como instrumentos de análisis y planeación territorial. En conjunto, los hallazgos evidenciaron que el diseño del modelo de clúster se encuentra en proceso de consolidación, sustentado en datos empíricos y en la participación activa de los actores locales. A medida que avance la implementación, se espera fortalecer la infraestructura, la innovación y la articulación institucional, garantizando que el café de la Sierra Negra transite de un esquema de producción tradicional hacia uno de desarrollo regional sostenible y competitivo. El trabajo realizado en torno a la cafeticultura de la Sierra Negra de Puebla evidencia una dinámica socioeconómica compleja, caracterizada por desafíos estructurales significativos, pero también por un horizonte de oportunidades que proyecta posibilidades reales de transformación y desarrollo sostenible. Por un lado, los hallazgos revelan un sector marcado por el rezago productivo, la dispersión organizativa y la limitada inserción en cadenas de valor globales; por el otro, ponen de manifiesto un capital humano dispuesto a transformar sus prácticas, a organizarse colectivamente y a explorar caminos innovadores para reposicionar al café de la región. Esta dualidad es, en sí misma, el motor que impulsa la necesidad de conformar un clúster cafetalero: una estrategia que articule a productores, instituciones y mercados bajo un modelo de cooperación y sostenibilidad. Los avances obtenidos hasta el momento

ofrecen un panorama alentador. Se cuenta con un diagnóstico sólido que no solo permite comprender las debilidades estructurales del sector, sino también identificar con claridad los nodos estratégicos desde donde se puede generar un cambio real. La disposición de los productores a participar en procesos de capacitación, certificación y organización comunitaria representa una ventaja competitiva latente que, de canalizarse adecuadamente, podría revertir años de rezago. Asimismo, la posibilidad de orientar la producción hacia nichos de mercado de especialidad y de aspirar a reconocimientos como la Taza de Excelencia México (Cup of Excellence) constituye una meta alcanzable que no solo incrementaría los ingresos, sino que también elevaría el prestigio de la Sierra Negra en el escenario nacional e internacional. De cara a los siguientes pasos, resulta imperativo profundizar en la modernización de la infraestructura, impulsar la transferencia tecnológica y establecer programas de formación integral que preparen a los cafeticultores para enfrentar las exigencias de un mercado cada vez más competitivo y selectivo. Pero más allá de lo técnico y lo productivo, el gran reto consiste en fortalecer la cohesión social y el sentido de identidad territorial. El café de la Sierra Negra no solo es un producto agrícola: es también una expresión cultural, un patrimonio vivo que integra conocimientos ancestrales, prácticas comunitarias y una estrecha relación con el entorno natural. Proteger, potenciar y dar valor a ese legado es parte esencial del proyecto. En términos de impacto académico y de investigación, el estudio abre líneas prometedoras en torno a la innovación social en entornos rurales, la gobernanza de los clústeres agroalimentarios y la evaluación de los efectos de las certificaciones en el bienestar comunitario. Asimismo, aporta elementos prácticos para la formulación de políticas públicas orientadas a fortalecer la economía rural desde un enfoque de sostenibilidad y competitividad. Con ello, el proyecto no solo contribuye al ámbito productivo, sino también al diseño de modelos replicables en otras regiones del país que enfrentan problemáticas similares. En suma, la construcción de un clúster cafetalero en la Sierra Negra de Puebla se perfila como un proyecto con un fuerte potencial transformador. No se trata únicamente de mejorar la productividad o de abrir nuevos mercados, sino de sembrar las bases de un desarrollo regional integral que combine competitividad, sostenibilidad e inclusión social. La visión es clara: que el café de la Sierra Negra deje de ser un actor marginal en el mapa nacional y se convierta en un referente de calidad, identidad y resiliencia. El éxito del proyecto no radicará solo en los quintales cosechados o en los precios alcanzados en el mercado, sino en la capacidad de sus comunidades para apropiarse del proceso, generar orgullo en su producto y proyectar al mundo un café que es, a la vez, fruto de la tierra, del esfuerzo colectivo y de una visión de futuro.

REFERENCIAS

AGRICULTURA Puebla. (2024, June 14). *Café Poblano: Orgullo Nacional*. Gobierno de Mexico. http://bit.ly/47hE8cw

Bray, J. G., & Neilson, J. (2017). Reviewing the impacts of coffee certification programmes on smallholder livelihoods. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystems Services and Management*, *13*(1), 216–232. https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1316520

Carayannis, E. G., & Campbell, D. F. J. (2009). "Mode 3" and "Quadruple Helix": Toward a 21st century fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*, *46*(3–4), 201–234. https://doi.org/10.1504/ijtm.2009.023374

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), & Secretaría de Desarrollo Rural del Gobierno del Estado de Puebla (SDR). (2024). *Guía para transitar a un modelo de cafeticultura sostenible para pequeños productores poblanos*. https://bit.ly/4oe7n5K

Escamilla-Prado, E., Tinoco-Rueda, J. A., Pérez-Villatoro, H. A., de Jesús Aguilar-Calvo, Á., Hernández-Sánchez, R., & Ayala-Montejo, D. (2021). Socio-Ecological Transformation In The Coffee Agroecosystem Affected By Rust In Chiapas, México; Transformación Socioecológica En El Agroecosistema Café Afectado Por Roya En Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *44*(4), 643–653. https://doi.org/https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.643

Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: From National Systems and "mode 2" to a Triple Helix of university-industry-government relations. *Research Policy*, *29*(2), 109–123. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4

Gereffi, G., Humphrey, J., & Sturgeon, T. (2005). The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, *12*(1), 78–104. https://doi.org/10.1080/09692290500049805

Jaffee, D. (2014). *Brewing Justice: Fair Trade Coffee, Sustainability, and Survival*. University of California Press. https://bit.ly/47f4D2b

Ma'ruf, M. I., Ngo, D. M., Bacsi, Z., & Bozsik, N. (2025). Evaluating the competitiveness of leading coffee-producing nations: A comparative advantage analysis across coffee product categories. *Open Agriculture*, *10*(1). https://doi.org/10.1515/opag-2025-0457

Moguel, P., & Toledo, V. M. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*, *13*(1), 11–21. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x

Porter, M. (1990). *Competitive Advantage of Nations*. *1*(1), 14. https://doi.org/10.1002/cir.3880010112

Porter, M. E. (1998). Clusters and the new economics of competition. *Harvard Business Review*, *76*(6), 77–90. https://bit.ly/47gtClL

Secretaría De Agricultura Y Desarrollo Rural. (2022, October 13). *Cultivo de café en México*. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017 - 2030*. https://bit.ly/planeacion-agricola

United Nations. (2015). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. https://sdgs.un.org/goals

Fuzzy Logic Model for Evaluating Water Quality in Nile Tilapia Aquaculture Ponds

Padilla Carrillo, Carlos Ivan*, Verduzco Ramírez, Jesús Alberto*, García Virgen, Juan*, Ruiz Tadeo, Ana Claudia*, Reyes Mendoza, Oscar Fabián, García Díaz, Noel***

**División de estudios de posgrado e investigación: Tecnológico Nacional de México campus Colima, C.P. 28976, Villa de Álvarez, Colima, México.*
(e-mails: {g2446010, averduzco, jgarcia, aruiz, ngarcia}@colima.tecnm.mx)

Teléfonos: (312) 430 2954, (312) 108 3193

***Departamento de Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el Océano; El Colegio de la Frontera Sur; C.P. 77014, Chetumal, Quintana Roo, México.*

(e-mail: Oscar.reyes@ecosur.mx)

Abstract: Aquaculture is a globally significant activity, playing a critical role in food security, employment generation, and the sustainable management of aquatic species. In Mexico, it is one of the main primary production sectors, actively developed in 23 of the country's 32 states. Despite its importance, aquaculture faces major challenges, particularly poor water quality and delayed emergency responses, which contribute to annual losses of up to 50% of production per pond. To address these issues, this study presents the design and implementation of a Mamdani-type fuzzy logic system for real-time assessment of water quality in aquaculture ponds. The model integrates five key environmental parameters — temperature, dissolved oxygen, pH, ammonia, and nitrates — to classify water conditions into qualitative categories (e.g., acceptable, warning, critical), providing a simple and interpretable decision support tool for farmers. The system was validated using real-world datasets collected from operational aquaculture ponds, demonstrating its effectiveness in accurately reflecting water quality conditions. This approach offers a low-cost, accessible alternative to conventional laboratory analyses, enhancing proactive management and reducing production losses.

Keywords: Water quality, fuzzy logic, aquaculture, decision support system.

1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura es una actividad productiva dedicada al cultivo y manejo de organismos acuáticos, que se encuentra en expansión a nivel mundial, esencial para la seguridad alimentaria y la conservación de especies acuáticas. En México esta actividad ha tenido un incremento constante en los últimos años, en 2018 se reportó un incremento constante durante los últimos 6 años, dando un aumento aproximado del 10% en la industria (SAGARPA, 2018).

Dentro de este contexto, la tilapia se ha consolidado como una de las principales especies cultivadas, por su relación costo-beneficio que favorece la rentabilidad de los negocios que la producen. Su producción se concentra en 23 de los 32 estados del país (Gobierno de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

Varios son los factores que influyen en el cultivo exitoso de la tilapia y de otras especies. La calidad del agua de cultivo, es un factor esencial en la acuicultura, pues de ella depende el bienestar, crecimiento y supervivencia de la especie cultivada. La calidad del agua la determinan un conjunto de parámetros, entre ellos los más importantes son: temperatura, oxígeno disuelto, el pH, y el nivel de amoniaco y nitritos. Según la literatura revisada, existen cinco parámetros fundamentales. El primero es la temperatura, es un factor determinante porque los peces son organismos ectotermos o poiquilotermos, es decir, dependen del agua para regular su temperatura corporal. En función de su rango térmico óptimo, las especies se clasifican como de agua fría, cálida o tropical. Cuando los peces se encuentran fuera de su rango ideal, se incrementa significativamente su tasa de mortalidad (E. Boyd, 2018).

El oxígeno disuelto (OD) es esencial para la supervivencia de los peces, ya que, a diferencia de los animales terrestres, estos deben bombear agua a través de sus branquias para obtener oxígeno molecular, lo que implica un mayor gasto energético. Cuando la concentración de OD disminuye, aumenta el riesgo de estrés, asfixia y mortalidad, convirtiendo su monitoreo en un aspecto crítico en la acuicultura (E. Boyd, 2022).

El pH también desempeña un papel determinante en el crecimiento y la salud de los peces. Valores elevados reducen la actividad alimentaria, el crecimiento y la eficiencia del factor de conversión alimenticia, además de suprimir la respuesta inmunológica (Kubitza, 2017). En contraste, valores bajos (pH < 6) provocan acidosis, irritación cutánea y exceso de mucosidad, pudiendo erosionar tejidos sensibles como las branquias y favorecer infecciones (NTLABS, 2014).

En cuanto al amoniaco (NH_3) y los nitratos (NO_3^-), ambos constituyen compuestos nitrogenados de gran impacto. El amoniaco es altamente tóxico incluso a bajas concentraciones, generando estrés, daño branquial, reducción del crecimiento y mayor susceptibilidad a enfermedades (Alltech, 2021). Aunque el nitrato es menos tóxico, su acumulación en el agua compromete el bienestar de los peces y promueve la proliferación excesiva de algas no deseadas (Deakro, 2025).

Para cada especie cultivada existen normas que definen los valores de estos parámetros para determinar la calidad del agua, sin embargo, estos valores fluctúan dentro de los estanques (Alltech, 2021). Las variaciones en estos factores exponen a los productores a riesgos elevados, como el menor crecimiento de los peces y pérdidas económicas significativas (Kubitza, 2024). Debido a esto, es fundamental un monitoreo diario que asegure los valores adecuados (Alltech, 2021).

1.1 Trabajos relacionados

En trabajos recientes relacionados con la automatización del monitoreo de la calidad del agua, se ha buscado mejorar el proceso tradicionalmente realizado de forma manual. El proyecto "Tecnologías IoT para la acuicultura sostenible", propone un sistema de monitoreo basado en Internet de las cosas (IoT) para recolectar datos de la temperatura, oxígeno disuelto y pH del agua en tiempo real y facilitar la toma de decisiones en granjas acuícolas (Medrano, 2025).

El trabajo "Aplicación web para el monitoreo remoto de parámetros de calidad del agua en estanques acuícolas usando aprendizaje automático e IoT", mide temperatura y oxígeno disuelto y publica los datos en una web accesible para productores, logrando monitoreo continuo y menor intervención humana (Parra Valenzuela & Quintero Meza, 2023).

Otra aportación destacada es "A Low-Cost AI Buoy System for Monitoring Water Quality at Offshore Aquaculture Cages", que propone una boya de bajo costo capaz de medir y registrar continuamente temperatura, oxígeno disuelto y salinidad, brindando movilidad y autonomía dentro de los estanques (Hoang- Yang Lu et al., 2022).

De forma similar, el proyecto "Aplicación de Sistemas Embebidos e IoT para el Monitoreo de Estanques Acuícolas en El Dorado, Sinaloa" implementa una red fija de nodos encargados de medir temperatura y oxígeno disuelto en distintos estanques. Cada nodo transmite la información a un nodo central o Gateway, responsable de consolidar los datos y enviarlos a una plataforma web IoT donde los productores pueden visualizar tanto las mediciones actuales como sus tendencias acompañado de gráficas para facilitar su análisis e interpretación (Nava Pintor, et al., 2018).

El proyecto "AquaStat: An Arduino-based Water Quality Monitoring Device for Fish Kill Prevention in Tilapia Aquaculture using Fuzzy Logic" de Molato (2022) emplea un dispositivo basado en Arduino para analizar la calidad del agua en el cultivo de tilapia usando lógica difusa. Este proyecto destaca por aplicar lógica difusa para el análisis de los datos recolectados. Sin embargo, considera: temperatura, oxígeno disuelto y pH, omitiendo parámetros como el amoniaco y los nitratos, esenciales para una evaluación más completa de la calidad del agua.

En conclusión, la medición de la calidad del agua en estanques acuícolas es un tema recurrente y relevante. Sin embargo, la mayoría de los trabajos publicados se enfocan únicamente en la adquisición de datos y no en su interpretación automatizada que facilite a los acuicultores la toma de decisiones con respecto a este proceso.

En este sentido, este trabajo propone una solución basada en lógica difusa para la determinación de la calidad del agua, debido a sus ventajas frente a otros enfoques. A diferencia de los métodos basados en condiciones rígidas ("si-entonces") o de los modelos de aprendizaje automático que requieren grandes volúmenes de datos etiquetados, la lógica difusa permite representar el conocimiento de expertos humanos mediante reglas lingüísticas y manejar la incertidumbre inherente a los sistemas. Además, ofrece bajo costo computacional, capacidad para modelar relaciones no lineales entre variables y una interpretación transparente de los resultados, que facilita su comprensión por parte de los productores acuícolas.

El sistema propuesto considera cinco variables: temperatura, oxígeno disuelto, pH, amoníaco y nitrato. Con estos parámetros de entrada, el sistema evalúa la calidad del agua y proporciona un resultado cualitativo en un formato de colores que facilitan la interpretación:

- Verde (Buena): indica condiciones óptimas del agua, en las cuales no se requiere intervención humana.
- Amarillo (Regular): Señala una calidad intermedia, en la cual los peces no enfrentan un riesgo alto, pero una exposición prolongada afectaría su salud.
- Rojo (Mala): representa condiciones críticas del agua que demandan una acción correctiva inmediata, debido al elevado riesgo de la especie cultivada.

Este enfoque permite traducir los datos de los sensores en información útil y comprensible para los acuicultores, facilitando la toma de decisiones oportunas sin requerir conocimientos técnicos avanzados. Los rangos óptimos utilizados para la implementación de este proyecto se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros óptimos de la calidad del agua para la tilapia del Nilo. (autoría propia).

Parámetro	Rango óptimo
Temperatura	25 – 30 °C
Oxígeno disuelto	5 – 8 mg/l
PH	6.5 – 8.5
Amoniaco	0 - 0.1 mg/l
Nitrato	0 – 50 ppm

2. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

En el diseño del modelo de lógica difusa se utilizó el software Matlab (Mathworks, 2021), que proporciona una interfaz gráfica para la visualización de las entradas, reglas y la salida del sistema. Se implementó el modelo Mamdani (Mamdani,

1975), por su adecuación a la naturaleza de la salida requerida y su compatibilidad con reglas basadas en conocimiento experto.

2.1 Arquitectura del sistema

La Figura 1 muestra el modelo conceptual de la arquitectura del sistema, compuesto por tres módulos. El primero corresponde a la adquisición de datos mediante sensores que registran cinco variables. El segundo realiza el procesamiento y análisis de los datos para generar una salida que representa la calidad del agua. El tercero presenta la salida del sistema como un semáforo de calidad del agua, interpretable por el acuicultor o el operador responsable.

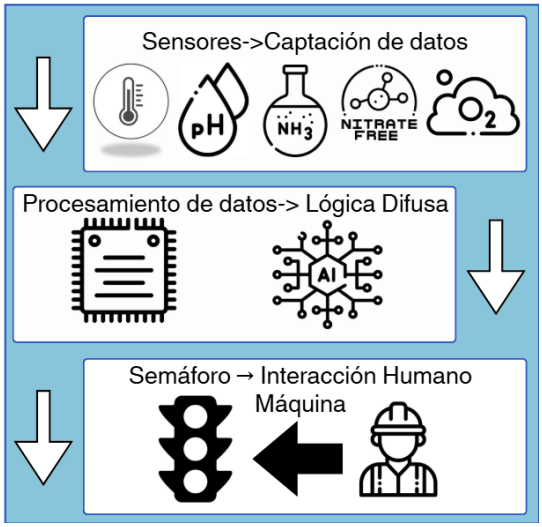


Figura 1. Arquitectura conceptual del modelo de lógica difusa (autoría propia).

En la figura 2 se ilustra la interfaz gráfica de Matlab para el modelo. Tenemos cinco entradas correspondientes a cinco variables y salida única que corresponde a la descripción de la calidad del agua, así como el recuadro intermedio, que representa las reglas aplicables a los datos de entrada para obtener la respuesta.

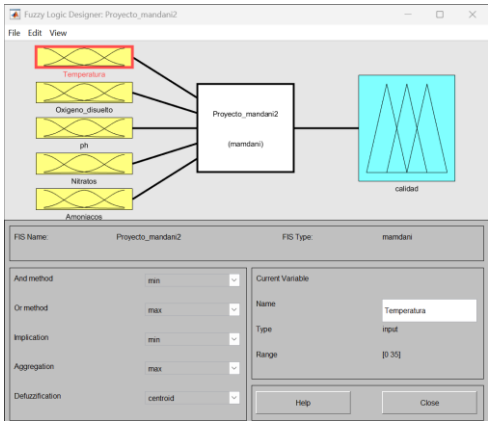


Figura 2. Interfaz gráfica de Matlab para el modelo de lógica difusa. (autoría propia).

2.2 Funciones de membresía

Para las funciones de membresía se utilizó la función trapezoidal debido a su simplicidad y bajo consumo computacional, además de la naturaleza misma de los datos.

Con respecto a las funciones de membresía de la temperatura se tienen 4 funciones y el rango de temperatura de la entrada tiene un rango de 0 a 35°C, considerando que la tilapia del Nilo es una especie tropical que resiste las altas temperaturas, pero muy susceptible a temperaturas bajas.

Figura 3. Funciones de membresía para la entrada de temperatura (autoría propia).

Las entradas del sistema se presentan en las Tablas 2 a 6, donde se muestran las funciones de membresía y los valores correspondientes a sus representaciones trapezoidales.

Tabla 2. Funciones de membresía para la entrada de temperatura y sus valores trapezoidales (autoría propia).

Función de membresía	Rango Trapezoidal
Extra_baja	[0 0 20 21]
Baja	[20 21 25 26]
Normal	[25 26 30 31]
Alta	[30 31 35 35]

Como se observa en la Tabla 2, cada función de membresía trapezoidal se define por cuatro valores [a b c d], que representan el inicio, la parte superior y el final del trapecio.

La siguiente entrada representa el parámetro del oxígeno disuelto la cual tiene 4 funciones de membresía como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Funciones de membresía para la entrada de oxígeno disuelto y sus valores trapezoidales (autoría propia).

Función de membresía	Rango Trapezoidal
Extra_bajo	[0 0 3 4]
Bajo	[3 4 5 6]
Normal	[5 6 7 8]
Alto	[7 8 10 10]

La tercera entrada del modelo corresponde al pH, teniendo tres funciones de membresía y sus rangos mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Funciones de membresía para la entrada de pH y sus valores trapezoidales (autoría propia).

Función de membresía	Rango Trapezoidal
Bajo	[4 4 6 6.5]
Normal	[6 6.5 8.5 9]
Alto	[8.5 9 11 11]

La cuarta entrada corresponde al nivel de Nitrato y cuenta con tres funciones de membresía apreciables en la tabla 5:

Tabla 5. Funciones de membresía para la entrada de nitratos y sus valores trapezoidales (autoría propia).

Función de membresía	Rango Trapezoidal
Ideal	[0 0 40 50]
Regular	[40 50 90 100]
Malo	[90 100 200 200]

La quinta entrada que es Amoniaco se muestra en la Tabla 6 con cuatro funciones de membresía y sus rangos.

Tabla 6. Funciones de membresía para la entrada de amoniaco y sus valores trapezoidales (autoría propia).

Función de membresía	Rango Trapezoidal
Optimo	[0.0 0.0 0.05 0.1]
Regular	[0.05 0.1 0.2 0.3]
Malo	[0.2 0.3 0.6 1.0]
Mortalidad_alta	[0.6 1.0 5.0 5.0]

Una vez definidas las entradas, se definió la salida que en este caso declaramos con el nombre de calidad, haciendo referencia a la calidad del agua (Figura 4).

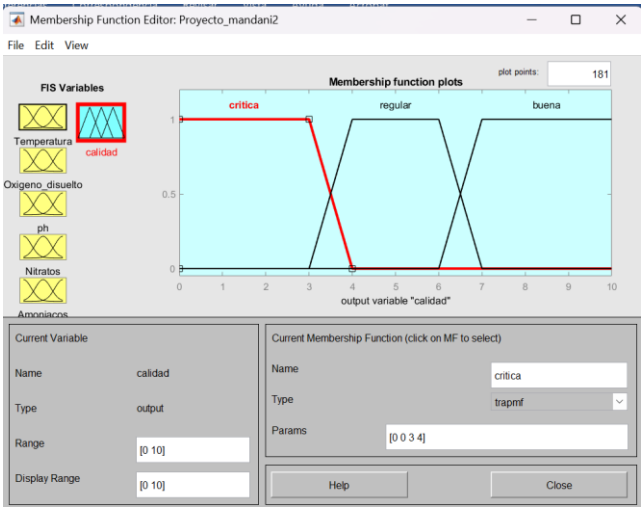


Figura 4. Funciones de membresía para la salida de Calidad del agua (autoría propia).

Los rangos de las funciones trapezoidales para la salida están dados por la Tabla 7.

Tabla 7. Funciones de membresía para la salida de calidad del agua y sus valores trapezoidales (autoría propia).

Función de membresía	Rango Trapezoidal
Rojo (Critica)	[0 0 3 4]
Amarillo (Regular)	[3 4 6 7]
Verde (Buena)	[6 7 10 10]

2.3 Reglas del sistema

Para el diseño de las reglas de inferencia difusa, se consideraron los conocimientos empíricos de los expertos en el campo de la acuicultura más la implementación de algunas reglas físicas y químicas, como, por ejemplo, el caso en el que el oxígeno disuelto suele bajar con altas temperaturas o un valor alto de pH favorece la creación de moléculas de amoniaco libre tóxico NH3. Su presencia es más dañina para los peces que el amonio NH4, el cual se forma con un pH neutro o bajo. Bajo estas directrices, se crearon 85 reglas de inferencia difusa para el sistema (Figura 5).

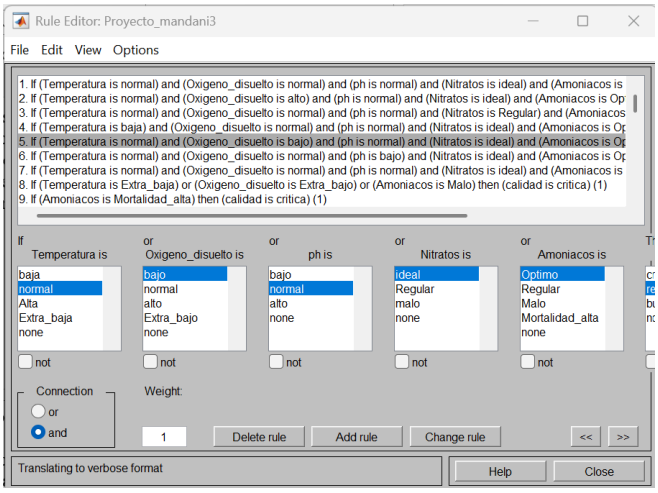


Figura 5. Reglas difusas (autoría propia).

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El sistema lógico difuso tipo mamdani, con cinco entradas (temperatura, oxígeno disuelto, pH, amoniaco y nitrato) y una salida o predicción (Calidad del agua), en el cual se aplicaron 85 reglas, analizaremos los resultados obtenidos analizando las gráficas e ingresando conjuntos de datos aleatorios.

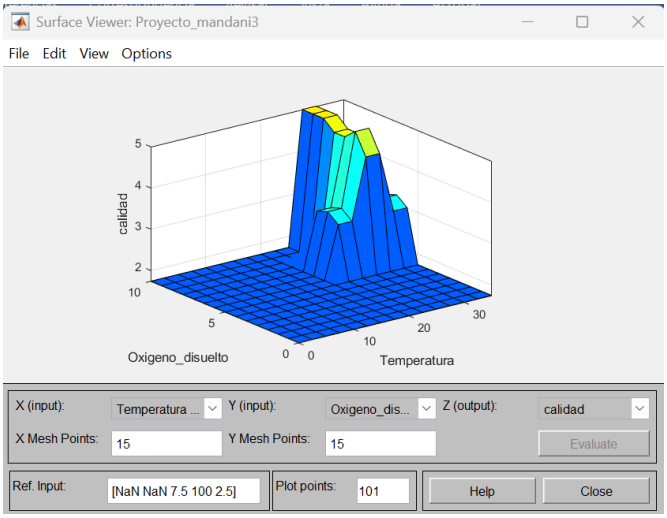


Figura 6. Gráfica de superficie de respuesta temperatura-oxígeno en modelo difuso (autoría propia).

Como podemos observar en la figura 6, la calidad no tiene ningún incremento, en el área donde el oxígeno y la temperatura son bajos, sin embargo, la calidad presenta un cambio repentino cuando la temperatura y el oxígeno entran a rango estables, solo volviendo a disminuir cuando la temperatura empieza a tomar valores extremadamente altos, aun así, la calidad en estos puntos es mayor que a temperaturas bajas.

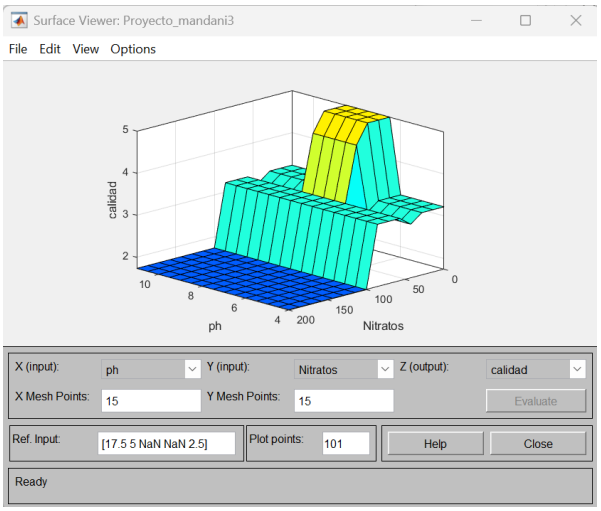


Figura 7. Gráfica de superficie de respuesta pH-Nitratos en modelo difuso (autoría propia).

En la Figura 7, se muestra el comportamiento del pH y los nitratos respecto a la calidad. Se observa que con un pH neutro y un valor de nitritos cercano a cero, la calidad del agua es la más alta, mientras que con un valor alto de nitritos independientemente del valor del pH, la calidad es mala, dando así paso a una zona intermedia donde la calidad del agua es regular con una concentración baja o moderada de nitratos. De esta manera, revisando las restantes ocho gráficas de superficie de respuesta, se determina el comportamiento de cada entrada respecto a las demás.

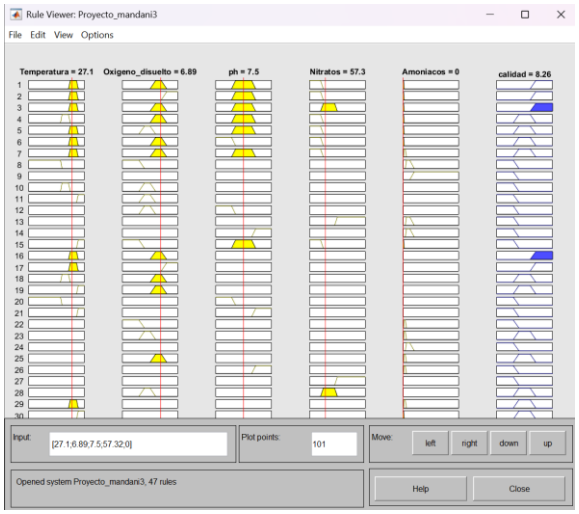


Figura 8. Respuesta de calidad del agua a un cierto conjunto de valores de entrada (autoría propia).

En este ejemplo de un conjunto de datos de entrada (Figura 8) vemos que un comportamiento normal o ideal de las variables de oxígeno (6.89 mg/l), temperatura (27.1°C), pH (7.5) y amoniaco (0 mg/l), con un comportamiento regular de los nitratos (57.3 mg/l) tenemos una calidad del agua buena con un valor de 8.25.

3.1 Validación del modelo

Para evaluar el modelo, se realizó una prueba de validación utilizando 15 conjuntos de datos. Tomando en cuenta que la salida del sistema es de naturaleza cualitativa (Buena, Regular o Mala), en este caso, la validación cuantitativa tradicional mediante métricas estadísticas no resulta aplicable. En su lugar, se realizó una prueba de consistencia utilizando quince escenarios hipotéticos representativos de diferentes condiciones de calidad del agua.

Estos escenarios se dividieron en tres grupos: cinco con condiciones esperadas de calidad mala y cinco de calidad regular recolectados de conocimiento experto, además de cinco de calidad buena (valores dentro de los rangos óptimos de la Tabla 1). A continuación, se mostrarán los resultados en la Tabla 8.

Tabla 8. Conjunto de datos con su respectiva salida del sistema (autoría propia).

Temp. (∘c)	O.D. (mg/l)	PH	Amoniaco (mg/l)	Nitrato (ppm)	Salida
27.5	6.5	8	0.05	20	8.26
29	7.5	8	0.01	45	8.15
26.5	5.8	7	0	5	7.6
28	7	8	0.07	35	7.36
25.8	6	7	0.04	15	7.6
26	4.5	8	0.05	25	5
25.5	6	6	0.05	30	6.65
32	7	8	0.1	50	5.1
28.5	6.5	8	0.25	30	5.84
24	5.8	6.8	0.01	25	4.31
20.5	6.5	8	0.05	40	1.74
28	3.5	7	0.1	50	1.85
31	7.5	10	0.35	10	2.78
27	3.3	8	0.02	20	2.72
29	5.5	7	0.05	110	3.97

Como se observa, la salida del sistema varía según los valores de los parámetros utilizados. Sin embargo, bajo las condiciones conocidas definidas por el conocimiento experto, el sistema selecciona correctamente los rangos de salida establecidos (Tabla 7), en función del conjunto de datos de entrada.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo describe la implementación de un modelo de lógica difusa basado en el sistema Mamdani, que emplea cinco variables de entrada para la predicción de la calidad del agua de cultivo en granjas acuícolas. Los resultados obtenidos indican que el modelo alcanza un rendimiento aceptable en comparación con otros trabajos reportados en la literatura y con las pruebas realizadas sobre los conjuntos de datos recolectados.

Sin embargo, es fundamental destacar que su validación en condiciones reales de campo, aún es necesaria, particularmente mediante la integración de sensores y una interfaz tipo semáforo, con el fin de evaluar tanto la precisión de los datos de entrada como la facilidad de interpretación del sistema por parte del personal de las granjas acuícolas, sin requerir conocimientos técnicos.

Como trabajo futuro, se propone implementar el modelo físico que permita una evaluación integral del desempeño del sistema en escenarios reales.

5. REFERENCIAS

Alltech, 2021. *Calidad del agua en la acuicultura.* [En línea]
Available at: https://www.alltech.com/es-mx/nutricion-animal/acuicultura/calidad-del-agua-en-la-acuicultura
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

D. Molato, M. R., 2022. AquaStat: An Arduino-based Water Quality Monitoring Device for Fish Kill Prevention in Tilapia Aquaculture using Fuzzy Logic. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA),* Volumen Volume 13.

Deakro, 2025. *La Importancia de Medir los Parámetros de Calidad de Agua en la Producción Acuícola.* [En línea]
Available at: https://deakro.co/mx/blog/posts/la-importancia-de-medir-los-parmetros-de-calidad-de-agua-en-la-produccin-acucola-c237fab37870/?srsltid=AfmBOorEz8l-dpq11X1rB0vnYNtjlRmqQP3lPxu8TVODZcD7O_f31ya_
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

E. Boyd, C., 2018. *Temperatura del agua en acuacultura.* [En línea]
Available at: https://www.globalseafood.org/advocate/temperatura-del-agua-en-acuacultura/
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

E. Boyd, C., 2022. *El oxígeno disuelto es una preocupación importante en la acuacultura. Este es el por qué.* [En línea]
Available at: https://www.globalseafood.org/advocate/el-oxigeno-disuelto-es-una-preocupacion-importante-en-la-acuacultura-este-es-el-por-que/
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

FAO , 2009. *Oreochromis niloticus (Linnaeus, 1758) [Cichlidae].* [En línea]
Available at: https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es_niletilapia.htm
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

Gobierno de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022. *La acuicultura o acuacultura es el conjunto de actividades, técnicas y conocimientos de crianza de especies acuáticas vegetales y animales..* [En línea]
Available at: https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-en-mexico
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

Hoang-Yang Lu, C.-Y. C. S.-C. C. Y.-H. C. W.-C. L. W.-L. J. F.-H. N. S.-H. C. a. N. A. U., 2022. A Low-Cost AI Buoy System for Monitoring Water Quality at Offshore Aquaculture Cages. *Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2021).*

Kubitza, F., 2017. *El parámetro de calidad del agua a menudo ignorado: pH.* [En línea]
Available at: https://www.globalseafood.org/advocate/el-parametro-de-calidad-del-agua-a-menudo-ignorado-ph/
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

Kubitza, F., 2024. *Agua verde o fangosa en estanques de tilapia de alta densidad: comparación del rendimiento, la calidad del agua y la intensidad del mal sabor.* [En línea]
Available at: https://www.globalseafood.org/advocate/agua-verde-o-fangosa-en-estanques-de-tilapia-de-alta-densidad-comparacion-del-rendimiento-la-calidad-del-agua-y-la-intensidad-del-mal-sabor/
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

Mamdani, . E. H., 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies,* 7(1), pp. 1-13.

Mathworks, 2021. *MATLAB (R2021a).* [En línea]
[Último acceso: 25 Septiembre 2025].

Medrano, K. H. E. T. R. y. M. E., 2025. IoT technologies for water quality monitoring in aquaculture. *European Public & Social Innovation Review.*

Nava Pintor, J. A. y otros, 2018. Aplicación de Sistemas Embebidos e IoT Para el Monitoreo de EstanquesAcuícolas en Eldorado, Sinaloa. *Memorias de las Jornadas de Investigación UAZ-20188 y 9 de noviembre de 2018,* pp. 22-42.

NTLABS, 2014. *Los efectos de la mala calidad del agua en los peces de su estanque.* [En línea]
Available at: https://www.nt-labs.com/knowledge-hub/how-poor-water-quality-affects-the-health-of-your-fish/
[Último acceso: 24 Septiembre 2025].

Parra Valenzuela, J. & Quintero Meza, R. R., 2023. *Aplicación web para el monitoreo remoto de los parámetros de calidad del agua en estanques acuícolas usando tecnologías de Aprendizaje maquina e Internet de las cosas,* Culiacán, México: s.n.

SAGARPA, 2018. *Crecen anualmente más de 10 por ciento pesca y acuacultura en México en los últimos seis años: SAGARPA.* [En línea]
Available at: https://www.gob.mx/agricultura/chiapas/articulos/crecen-anualmente-mas-de-10-por-ciento-pesca-y-acuacultura-en-mexico-en-los-ultimos-seis-anos-sagarpa-174961?idiom=es
[Último acceso: 2025].

Initial Growth of Carrot (*Daucus Carota* L.) in Response to Biofertilization with *Rhizobium*

Solís Zebadúa, Stephanie[*] Sarmiento Megchum, Erick Fabián[*] Rincón Rosales, Reiner[*] Rincón Molina, Clara Ivette[*] Manzano Gómez, Luis Alberto[*,] Gen Jiménez, Adriana[*]**

[*] *Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Laboratorio de Ecología Genómica y Agricultura Regenerativa. Carretera Panamericana km 1080, Boulevares. 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (M19270398@tuxtla.tecnm.mx, M19270426@tuxtla.tecnm.mx, reiner.rr@tuxtla.tecnm.mx, clara.rm@tuxtla.tecnm.mx, D14270281@tuxtla.tecnm.mx, D10270415@tuxtla.tecnm.mx)*

[**] *3R Biotec S.A. de C.V., Departamento de Investigación y Desarrollo. Colonia Centro, 233. 29000 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (D14270281@tuxtla.tecnm.mx)*

Abstract: Modern agriculture faces the challenge of increasing food production while reducing its environmental impact. In this context, the use of rhizobial bacteria as plant probiotics represents a sustainable alternative for improving crop nutrition. This study aimed to evaluate the effect of three native strains of *Rhizobium* (*R. calliandrae*, *R. mayense*, and *R. jaguaris*) on the early growth of carrot (*Daucus carota* L.) under greenhouse conditions. Carrot plants (cv. Nantes Scarlet) were grown in soil with high macronutrient availability and favorable physicochemical properties. Eight treatments were evaluated, including combinations of bacterial inoculants with and without chemical fertilizer, a chemical fertilizer control, and a negative control. Preliminary results at 11 days after transplanting revealed significant differences in plant height. The tallest plants were found in treatments with *Rhizobium* inoculation alone and the negative control, both outperforming the chemical fertilizer control. The results suggest that the rhizobial strains promoted early growth, potentially by enhancing micronutrient availability and modulating plant nutrient uptake mechanisms. The study supports the use of rhizobia-based biofertilization as a strategy to reduce chemical inputs in carrot cultivation and improve early plant development.

Keywords: Plant probiotics, nutrient uptake, sustainable agriculture, soil fertility, plant-microbe interactions.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna enfrenta la presión de satisfacer una creciente demanda alimentaria sin comprometer la sustentabilidad ambiental. La biofertilización aunada a la biofortificación mediante inoculantes microbianos ha surgido como una estrategia prometedora para mejorar el valor nutricional y el desempeño agronómico de los cultivos. Entre estos, las bacterias del género *Rhizobium* son ampliamente conocidas por su capacidad de fijación simbiótica de nitrógeno en leguminosas, pero estudios recientes han demostrado su eficacia como promotores del crecimiento vegetal en cultivos no leguminosos, mediante la producción de fitohormonas mejorando en la absorción de nutrientes (Biswas et al., 2000; Flores-Félix et al., 2013)

La zanahoria (*Daucus carota* L.), un cultivo de raíz de importancia global destaca por su alto contenido de beta-caroteno. Sin embargo, su productividad puede verse limitada por el agotamiento del suelo y la escasa disponibilidad de nutrientes. Diversas investigaciones han demostrado que el uso de bacterias benéficas mejora la biodisponibilidad de nutrientes como el fósforo y los micronutrientes (Kumar et al., 2019; Belimov et al., 2020)

El presente estudio evalúa el efecto de tres cepas nativas de Rhizobium sobre el desarrollo inicial de zanahoria en condiciones de invernadero. La investigación está en curso y se centra en parámetros de crecimiento y fertilidad del suelo, con miras a evaluar el impacto en la calidad nutricional del cultivo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Ubicación del sitio experimental

Las pruebas de biofertilización en plantas de zanahoria (*Daucus carota*) se llevaron a cabo en el invernadero del Centro de Investigación y Transferencia de Tecnología San Lorenzo perteneciente al Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal (ICAMEX) ubicado en el Conjunto SEDAGRO S/N, Rancho San Lorenzo, C.P. 52140, Metepec, Estado de México, con coordenadas 19°14'26.3" Norte y 99°35'14.1" Oriente.

2.2 Material biológico

Las plantas se generaron a partir de semillas de zanahoria (*Daucus carota*) variedad nantes Scarlet obtenidas de la empresa Caloro® ubicada en Guadalajara, Jalisco, con un porcentaje de germinación del 90% y un 99% de pureza, tratadas con Thiram.

Las cepas bacterianas *Rhizobium calliandrae* LBP2-1, *Rhizobium mayense* NSJP1-1 y *Rhizobium jaguaris* SJP1-2, fueron obtenidas de la colección de cepas del laboratorio 1 de Ecología Genómica y Agricultura Regenerativa del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Estas cepas fueron aisladas de nódulos de raíz de *Calliandra grandiflora* (Rincón-Rosales et al., 2013) y se caracterizan por su potencial como promotoras del crecimiento vegetal y sus genomas indican no ser tóxicas y no patógenas para humanos, plantas y medio ambiente (Gen-Jiménez et al., 2023).

2.3 Pruebas de propagación

Las plantas de zanahoria generadas a partir de semillas var. nantes scarlet fueron sembradas en bandejas de plástico de polietileno de 200 celdas con una apertura 2.3x1.8 cm, altura 4.2 cm, y base 1.9 cm, y con una capacidad volumétrica de 13 mL, las cuales tenían un sustrato compuesto de Peat moss con agrolita proporción 1:2 (v/v).

2.4 Pruebas de biofertilización

Las cepas fueron reactivadas en medio YM durante 24 horas a 140 rpm, posteriormente escaladas en medio YM a 80x2 BPM. Se evaluaron ocho tratamientos: T1: *R. calliandrae*, T2: *R. mayense*, T3: *R. jaguaris*, T4: *R. calliandrae* + fertilizante, T5: *R. mayense* + fertilizante, T6: *R. jaguaris* + fertilizante, T7: Fertilizante triple 19 (control positivo) y T8: Control negativo, cada tratamiento con 24 repeticiones, resultando en un total de 192 unidades experimentales.

Diez días antes del trasplante, el suelo hortícola utilizado fue desinfectado con 1.5 L del fungicida PREVICUR® Energy por maceta, las cuales habían sido previamente regadas con 1 L de agua corriente para asegurar un 75% de saturación del suelo de acuerdo el análisis de capacidad de retención de agua.

Las plantas fueron trasplantadas 29 días después de la germinación a bolsas de polietileno de 50 cm de altura y 30 cm de ancho, con 4 kg de sustrato hortícola. Para los tratamientos bacterianos (T1–T6), las raíces fueron inoculadas mediante inmersión durante 20 minutos en caldo YM ajustado a una $D.O._{600} = 0.2$ ($\approx 10^7$ UFC/mL). Las plantas fueron diespuestas en un diseño completamente al azar y se regaron con 1 L de agua corriente cada siente días.

Doce días después del trasplante se aplicó la primera biofertilización (10 mL por planta) mediante la técnica anillada. Las variables de altura fueron registradas un día antes de esta aplicación, es decir once días después del trasplante, 49 después de la siembra.

El fertilizante utilizado fue Poly-Feed® GG vegetativo 19-19-19 + M.E., el cual según lo indicado en la ficha técnica para cultivo de zanahoria, se diluyeron 10 g por cada litro de agua para su aplicación por fertirriego.

2.5 Análisis del suelo hortícola

El análisis del suelo hortícola se llevó a cabo por el servicio brindado por el laboratorio de suelos del Instituto Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal (ICAMEX).

2.6 Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$), utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Germinación

Las semillas de zanahoria germinaron de 9-11 días después de la siembra, indicando alta viabilidad y consistencia con el desarrollo normal fenológico de esta especie, según lo reportado por Vega-Rojas et al., 2012 en un híbrido Bangor.

De los parámetros que más afectan la germinación de las semillas de zanahoria es la temperatura y porcentaje de humedad relativa para iniciar el proceso de imbibición por parte de la semilla. La temperatura promedio en el tiempo de la germinación fue de 19.4 °C y el porcentaje de humedad relativa fue de un 70.8%, resultando en un 99% de germinación. Según lo reportado por Sousa-Pereira et al., 2008, la temperatura óptima para zanahoria variedad Brasília fue de 20 °C obteniendo un 85% de germinación, además indicaron que temperaturas altas desde los 35 °C disminuye drásticamente el porcentaje germinación hasta un 27%, concluyendo que temperaturas elevadas en el proceso de germinación podrían comprometer su establecimiento en campo.

Algunos otros factores que podrían influir la germinación de semillas están relacionados con el lote de las semillas, el momento de producción de las mismas como la variedad y el orden de umbelas que presentaron al ser recolectadas (Paparella et al., 2024; Nongthombam et al., 2025).

Además, un sustrato con baja compactación y una profundidad de siembra adecuada —no excesiva— favorecen significativamente la velocidad y uniformidad de la germinación. Estas condiciones permiten una mayor facilidad en la expansión de la raíz primaria y la emergencia de los cotiledones, reduciendo la resistencia mecánica del suelo sobre los tejidos en desarrollo. En particular, profundidades entre 1 y 2 cm han demostrado ser óptimas para maximizar la emergencia en diversas especies hortícolas, mientras que una compactación excesiva o siembras profundas pueden retrasar o incluso impedir la emergencia del brote radicular y del hipocótilo, afectando la morfología inicial de la plántula (Weaver, 1980; Wilson y Thurling, 1996)

3.2 Análisis del suelo hortícola

El análisis fisicoquímico del suelo hortícola mostró un pH de 7.5. Se determinó que el suelo está compuesto en un 84% de arena, 8% de arcilla y 8% de limo, lo que lo clasifica como areno franca, y la densidad aparente de 0.87 g/cm^3, lo clasifica como suelo orgánico, estas características suelen ser lo ideal en cultivos de zanahoria (Tabla 1).

Un pH de 7.5 señala que el suelo es moderadamente alcalino, lo que puede limitar la disponibilidad de micronutrientes clave para el desarrollo de las plantas, como el hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu) (Gupta et al., 2008).

Suelos alcalinos suelen contener mayor presencia de carbonatos de calcio, fosfatos de calcio y grupos hidroxilo que provocan la precipitación de estos micronutrientes, dejándolos no tan disponibles para las plantas (Szeląg-Sikora et al., 2019), además, la presencia de metales como el aluminio (Al) y el hierro (Fe) puede estar limitada, lo que afecta la absorción de estos nutrientes por las plantas (Riaz et al., 2020; Martínez-Soto et al., 2022). Una textura areno franca suele presentar buena aireacion y buen drenaje, lo que se relaciona con menor dureza y permite un mejor crecimiento de las raíces de zanahoria fomentando raíces pivotantes, rectas y uniformes. Seljåsen et al., 2012 como Añez y Espinoza, 2002 tuvieron los mejores rendimiento en suelos franco arenosos (70-85% de arena) y arenosos respectivamente. Sin embargo, también se reportado que suelos arenosos suelen tener menor contenido de hierro posiblemente relaciona con la lixiviación de este elemento (Szeląg-Sikora et al., 2019).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo hortícola.

Parámetro	Método	Resultado	Interpretación	Rango óptimo zanahoria	Cita
pH	1:2 suelo/agua	7.5	Medianamente alcalino	6.0 – 6.8	Seljåsen et al., 2012; Kumar et al., 2023
% Arena	Bouyoucos	84%	Areno franco	40 – 85%	Seljåsen et al., 2012; Rohwer, 2021
% Arcilla		8%		5 – 20%	
% Limo		8%		10 – 30%	
Densidad aparente	Probeta	0.87 g/cm^3	Suelos orgánicos		

Por otra parte, la cantidad de carbono orgánico (1.93%) y materia orgánica (3.33%) se clasifican como contenidos medios según la NOM-021-SEMARNAT-2000, pero que entran dentro de lo óptimo para el cultivo de zanahoria. La capacidad de intercambio catiónico (48.68 meq/100g) como el contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio son altos y muy altos tanto lo reportado por la NOM-021-SEMARNAT-2000 como para el cultivo de zanahoria (Tabla 2).

El elevado valor de capacidad de intercambio catiónico (CIC) identificado en este estudio sugiere una notable aptitud del suelo para retener y suministrar nutrientes, lo cual constituye un factor clave en su fertilidad. Una CIC alta suele estar asociada a una mayor proporción de partículas finas, como la arcilla, que incrementan la retención de cationes esenciales como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K), fundamentales para el desarrollo vegetal (Yang et al., 2024). Aunque un pH ligeramente alcalino puede reducir la disponibilidad de ciertos micronutrientes, este efecto no necesariamente anula las ventajas de una CIC elevada. En suelos con alta CIC, los macronutrientes esenciales suelen estar más disponibles (Gen-Jiménez et al., 2025).

Por otra parte, la materia orgánica desempeña un papel central en la fertilidad edáfica y la productividad agrícola. Su presencia en niveles moderados constituye un indicador favorable para el cultivo de zanahoria, ya que mejora la estructura del suelo, incrementa su capacidad de retención hídrica y facilita la disponibilidad de nutrientes esenciales. Estos atributos son fundamentales para promover un crecimiento vigoroso y saludable de las plantas (Fageria, 2012; Ankenbauer y Loheide, 2017; Minasny y McBratney, 2018; Lal, 2020).

Por otro lado, es importante considerar la disponibilidad de nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio, que se encontraron en altas cantidades en el análisis del suelo. El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, involucrado en la síntesis de proteínas y carbohidratos como en procesos como la fotosíntesis (Fathi, 2022). Sin embargo, en cultivos de zanahoria, la cantidad excesiva de nitrógeno se relaciona con deformaciones en las raíces pivotantes provocando divisiones y bajando la calidad de este y reduciendo el rendimiento comercial.

De igual manera, el fósforo es vital para la transferencia de energía en las plantas, estimula el diámetro de las raíces y aumenta la tasa de crecimiento (Fathi y Afra, 2023). El potasio es importante para el desarrollo radicular y la producción de azúcar y almidón. La cantidad alta de estos macroelementos podrían indicar un suelo fértil para el desarrollo del cultivo de zanahoria, sin dejar de mencionar que dosis inadecuadas y elevadas pueden afectar significativamente la disponibilidad de algunos micronutrientes afectando de manera negativa el crecimiento y rendimiento del cultivo (Szeląg-Sikora et al., 2019).

Tabla 2. Fertilidad del suelo hortícola.

Parámetro	Método	Resultado	NOM-021-SEMARNAT-2000	Rango óptimo zanahoria	Cita
Carbono orgánico	Walkley y Black	1.93%	Medio	1.5 – 3.0%	Szeląg-Sikora et al., 2019
Materia orgánica	Walkley y Black	3.33%	Medio	2-5%	Kumar et al., 2023
C.I.C.	Acetato de amonio	48.68 meq/100g	Muy alto	20 – 30 meq/100g	Curtin et al., 2015
Nitrógeno total	Kjeldahl	0.65%	Alto	0.2 – 0.5%	
Fósforo P_2O_5	Bray I	122.03 ppm	Muy alto		
Potasio (K)	EAA	2956.10 ppm	Muy alto		Szeląg-Sikora et al., 2019
Calcio (Ca)	EAA	3119.86 ppm	Muy alto		
Magnesio (Mg)	EAA	2928.00 ppm	Muy alto		

El análisis fisicoquímico del suelo hortícola revela que, según las cantidades de materia orgánica y la CIC, existe un buen potencial para la retención de nutrientes y agua, además de las altas cantidades de nitrógeno total, fósforo y potasio disponibles indican un suelo fértil, sin escatimar que el pH ligeramente alcalino puede reducir la disponibilidad de ciertos micronutrientes esenciales, además de la posible lixiviación por el alto porcentaje de arena. Por lo tanto, el suelo tiene un buen potencial debido a su estructura y capacidad de retención, sin olvidar que siempre es importante tener un manejo cuidadoso para no afectar el rendimiento y crecimiento del cultivo en cuestión.

3.3 Efecto de los tratamientos sobre la altura de las plantas

Los datos sobre la altura de las plantas a los once días después del trasplante muestran diferencias altamente significativas entre los tratamientos. Se muestran tres grupos diferentes, los tratamientos con las cepas inoculadas como el control negativo (1, 2, 3 y 8) muestran las mayores alturas, destacando *R. mayense* con 12.79 cm, seguido por los tratamientos con inoculación bacteriana y fertilización química (4, 5 y 6), y por último, el de menor altura, el tratamiento con fertilizante triple 19 (5.93 cm) (Tabla 3). La diferencia de altura es muy visible entre tratamientos y se puede observar en la Figura 1.

Tabla 3. Comparación de la altura de los tratamientos, prueba Tukey HSD ($p < 0.05$)

Tratamiento	Altura (cm)
1. *Rhizobium calliandrae*	11.31 ± 0.4369 A
2. *Rhizobium mayense*	12.79 ± 0.3336 A
3. *Rhizobium jaguaris*	12.08 ± 0.4389 A
4. *R. calliandrae* + fertilizante	8.10 ± 0.2963 B
5. *R. mayense* + fertilizante	7.87 ± 0.4129 B
6. *R. jaguaris* + fertilizante	7.75 ± 0.3970 B
7. Fertilizante triple 19	5.93 ± 0.2907 C
8. Control negativo	12.5 ± 0.3268 A
Valor – p	0.0000
HSD ($p < 0.05$)	1.60947

El bajo rendimiento del fertilizante podría deberse a un exceso de macronutrientes que limita la absorción de micronutrientes esenciales como hierro, zinc y manganeso. Como se observó con anterioridad, la cantidad de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio ya se encontraban en cantidades elevadas en el suelo, la aplicación del fertirriego pudo ocasionar que estas concentraciones aumentaran, causando problemas de deficiencia micronutricional. La sobre-fertilización es un proceso de aplicación no moderara de fertilizante que excede la capacidad de asimilación por la planta para que su productividad sea máxima. Esta práctica puede ocasionar la acumulación de los nutrientes en el suelo que se convierten en deficiencias en la salud de la planta a causa del desequilibrio nutricional (Monge-Pacheco et al., 2007).

Figura 1. Diferencias de altura entre los tratamientos.

Algunas sintomatologías presentes podrían ser causa de dificiencias micronutricionales. La aparición de amarillamiento en las hojas jóvenes (Figura 2, (a)) podría indicar deficiencia de hierro. El hierro, aunque no forma parte de la clorofila, está involucrado en procesos de fotosíntesis que afectan directamente este proceso. Szeląg-Sikora et al., 2019 marcan la deficiencia de manganeso en zanahoria con un crecimiento retardado y reducción en rendimiento. Y por último, la deficiencia de zinc resulta en plantas enanas o de baja estatura, debido a que el zinc en las plantas actúa como estabilizador de proteínas y como cofactor enzimático en la síntes i s de auxinas, el cual determina las condiciones de crecimiento y desarrollo de las plantas (Figura 2, (b)).

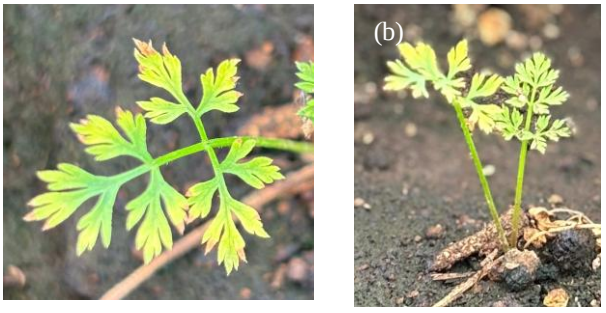


Figura 2. Sintomatologías en plantas con fertilizante químico: (a) amarillamiento en hojas, (b) enanismo.

No obstante, los tratamientos que combinaron *Rhizobium* con fertilizante (T4–T6) mostraron mejores resultados que el fertilizante solo, indicando que las bacterias pueden contrarrestar los efectos negativos de la sobre-fertilización mediante la movilización de micronutrientes mediante la producción de sideróforos o agentes quelantes, acidificación del suelo por la producción de ácidos orgánicos y la producción de hormonas de crecimiento como el ácido indol acético.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Flores-Félix et al. (2013), quienes observaron un incremento en la biomasa y altura de zanahorias inoculadas con *Rhizobium*. Asimismo, Gen-Jiménez et al., 2023 documentaron que estas bacterias mejoran la absorción de nutrientes y estimulan la producción

de fitohormonas como auxinas y ácido indolacético (IAA), favoreciendo el alargamiento celular.

Las plantas que mostraron mayor altura —tanto las inoculadas con cepas del género *Rhizobium* como las del control negativo— se desarrollaron en un sustrato caracterizado por alta fertilidad, evidenciada por una abundante disponibilidad de macronutrientes, una capacidad de intercambio catiónico elevada y un contenido adecuado de materia orgánica, según lo indicado por el análisis fisicoquímico. Esto sugiere que, incluso sin intervención química, las condiciones edáficas permitieron un crecimiento adecuado de las plantas.

La acción promotora de las bacterias podrá ser corroborada en fases más avanzadas del desarrollo del cultivo, particularmente mediante la medición del rendimiento y la composición nutricional del órgano de consumo.Está documentado que las bacterias rizobianas ejercen efectos moduladores sobre la nutrición vegetal a través de mecanismos de señalización química y genética, optimizando la absorción de nutrientes según las demandas fisiológicas de la planta. Este proceso evita la sobreacumulación de ciertos elementos que, en exceso, pueden resultar fitotóxicos, inducir deformaciones morfológicas (como el engrosamiento anormal de la raíz pivotante), o favorecer la acumulación de metales pesados como cadmio (Cd) y cobre (Cu), los cuales representan un riesgo tanto agronómico como para la salud del consumidor (Biswas et al., 2000; Kumar et al., 2019; Szeląg-Sikora et al., 2019; Belimov et al., 2020; Quiri et al., 2020).

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares indican que la inoculación con cepas de *Rhizobium*, en especial *R. mayense*, favorece significativamente el crecimiento inicial de *Daucus carota* L. A los 11 días después del trasplante, se observaron diferencias estadísticas altamente significativas en la altura de planta entre tratamientos ($p < 0.01$). El tratamiento con *R. mayense* alcanzó una altura promedio de 12.79 ± 0.3336 cm, seguido por el control negativo (12.5 ± 0.3268 cm) y *R. jaguaris* (12.08 ± 0.4389 cm), mientras que el tratamiento con fertilizante químico mostró un valor inferior (5.93 ± 0.2907 cm). Estos resultados sugieren que los rizobios no solo favorecen el crecimiento temprano, sino que podrían modular la absorción nutrimental y mejorar el equilibrio fisiológico del cultivo sin necesidad de insumos químicos. En futuras etapas se evaluarán características morfológicas de la raíz y el contenido nutrimental del producto cosechado. En conjunto, la biofertilización con rizobios se perfila como una estrategia efectiva para fortalecer la sostenibilidad en la horticultura.

REFERENCIAS

Ankenbauer, K. J., & Loheide, S. P. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, 31(4), 891-901. https://doi.org/10.1002/hyp.11070

Añez, B., & Espinoza, W. (2002). Fertilización química y orgánica: efectos interactivos o independientes sobre la producción de zanahoria. Rev. Forest. *Venez*, 46(2), 47-54.

Belimov, A. A., et al. (2020). The role of symbiotic microorganisms, nutrient uptake and rhizosphere bacterial community in response of pea (*Pisum sativum* L.) genotypes to elevated Al concentrations in soil. *Plants*, 9(12), 1801. https://doi.org/10.3390/plants9121801

Biswas, J. C., Ladha, J. K., & Dazzo, F. B. (2000). Rhizobia inoculation improves nutrient uptake and growth of lowland rice. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5), 1644-1650. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451644x

Curtin, D., Fraser, P. M., & Beare, M. H. (2015). Loss of soil organic matter following cultivation of long-term pasture: effects on major exchangeable cations and cation exchange capacity. *Soil Research*, 53(4), 377-385. https://doi.org/10.1071/SR14173

Fageria, N. K. (2012). Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(16), 2063-2113. https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234

Fathi, A. (2022). Role of nitrogen (N) in plant growth, photosynthesis pigments, and N use efficiency. *Agrisost*, 28, 1-8. https://doi.org/10.5281/zenodo.7143588

Fathi, A., & Afra, J. M. (2023). Plant Growth and Development in Relation to Phosphorus: A review. Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. *Agriculture*, 80(1), 1-7. https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:2022.0012

Flores-Félix, J. D., et al. (2013). Use of *Rhizobium leguminosarum* as a potential biofertilizer for *Lactuca sativa* and *Daucus carota* crops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(6), 876-882. https://doi.org/10.1002/jpln.201300116

Gen-Jiménez, A., et al. (2023). Enhance of tomato production and induction of changes on the organic profile mediated by *Rhizobium* biofortification. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1235930. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1235930

Gen-Jiménez, A., et al. (2025). Bacterias Rizosféricas y Endófitas con Potencial PGPB Aisladas del Cultivo de Maíz (*Zea mays* L.) en Chiapas, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 43. https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2002

Gupta, N., Kening, W., & Liang, Z. (2008). Influence of iron-deficiency on the photosynthetic efficiency and antioxidant metabolism of an Indian mustard cultivar. *Journal of Plant Nutrition*, 31(5), 779-795.

Kumar, A., et al. (2019). Role of rhizobia for sustainable agriculture: lab to land. In Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Agricultural Sustainability: From Theory to Practices (pp. 129-149). *Springer Nature*.

Kumar, N., Bharose, R., & Thomas, T. (2023). Response of Different Combination Levels of NPK and FYM on Physicochemical Properties of Inceptisol Soil at Prayagraj District, Uttar Pradesh, India under Cultivation of Carrot (*Daucus carota*). *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(18), 321-326.

Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. https://doi.org/10.1002/agj2.20282

Martínez-Soto, R. A., et al. (2022). Effects of different land-use systems on soil physicochemical properties of a chernozem in northeast México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(3), 1-15.

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39-47. https://doi.org/10.1111/ejss.12475

Monge-Pacheco, E., et al. (2007). Efecto de la sobrefertilización nitrogenada en la calidad de las manzanas.

Nongthombam, A., et al. (2025). Study on Growth and Yield Performance of Various Carrot Varieties. *SSRN* 5284715. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5284715

Paparella, A., et al. (2024). Challenges and opportunities in the sustainable improvement of carrot production. *Plants*, 13(15), 2092. 10.3390/plants13152092

Riaz, M. U., et al. (2020). Fate of micronutrients in alkaline soils. In Resources are used efficiently in agriculture (pp. 577-613). Springer.

Rincón-Rosales, R., et al. (2013). *Rhizobium calliandrae* sp. nov., *Rhizobium mayense* sp. nov. and *Rhizobium jaguaris* sp. nov., rhizobial species nodulating the medicinal legume *Calliandra grandiflora*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63(Pt_9), 3423-3429. https://doi.org/10.1099/ijs.0.048249-0

Rohwer, C. L. (2021). Carrot yield and shape altered by seeding rate and raised beds in clay-loam soil. *HortScience*, 56(6), 722-729. 10.21273/HORTSCI15823-21

Seljåsen, R., et al. (2012). Effects of genotype, soil type, year and fertilisation on sensory and morphological attributes of carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(8), 1786-1799. https://doi.org/10.1002/jsfa.5548

Sousa-Pereira, R. A., et al. (2008). Germinação e vigor de sementes de cenoura armazenadas em ambiente refrigerado. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(5), 1400-1406.

Szeląg-Sikora, A., et al. (2019). Impact of integrated and conventional plant production on selected soil parameters in carrot production. *Sustainability*, 11(20), 5612. https://doi.org/10.3390/su11205612

Vega Rojas, T., et al. (2012). Análisis del crecimiento de cinco híbridos de zanahoria (*Daucus carota* L.) mediante la metodología del análisis funcional. *Agronomía costarricense*, 36(2), 29-46.

Weaver, K. N. (1980). Field emergence of calabrese and onion seedlings in response to compaction treatments on the soil surface or at seed depth. *Journal of Horticultural Science*, 55(4), 325-332. https://doi.org/10.1080/00221589.1980.11514941

Wilson, C. E., & Thurling, N. (1996). Effect of sowing depth and water potential on seedling emergence of Lupinus species. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 36(4), 463-471. https://doi.org/10.1071/EA9960463

Yang, M., et al. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. https://doi.org/10.3390/agronomy14030629

NDVIcam: A multispectral camera for obtaining the NDVI index and Nitrogen levels in plants illuminated by LEDs

Luis A. Gama-Moreno*. Mayra I. Montero-Cortes*, Violeta H. Plazola Soltero*,

Christian G. Murguia Vadillo*, J. Angel Torres-Rangel*, Alvaro A. Ortiz-Garcia*

**TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO, Campus Tlajomulco*

Km. 10 Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. México.

e-mail: (luis.gm, mayra.mc, violeta.ps, Christian.mv, jose.tr, alvaro.og)@tlajomulco.tecnm.mx

Abstract: Precision Agriculture has provided farmers with more tools to improve the operation of their fields and offers the advantages of collecting real-time data on the various variables that influence production, reducing resources and labor, thus lowering costs, and increasing product quality, among others. This paper presents a system for detecting nutrient deficiencies in plants within controlled crops illuminated with LEDs. The system consists of: 1) a modified, low-cost multispectral camera that captures both the infrared and RGB spectra of the same target; and 2) an application called NDVICam, which is based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). NDVI is used to estimate the quantity, quality, and development of vegetation by measuring the intensity of radiation from certain bands of the electromagnetic spectrum that vegetation reflects. This paper presents results applied to in vitro-grown sweet potato seedlings, which were monitored at different growth stages to assess their progress in an environment where LED lighting replaces sunlight. Using NDVIcam, the user can evaluate the effectiveness of LED lighting schemes and make necessary adjustments to the growing conditions in real time.

Keywords: NDVI, LED, Mobile-computing, In vitro, *Dioscorea remotiflora.*

1. INTRODUCCION

La Agricultura de Precisión (AP) consiste en la aplicación de un conjunto de técnicas, apoyadas por equipamiento de alta tecnología dentro de las cuales destacan, los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores remotos, imágenes aéreas y/o satelitales junto con Sistemas de Información Geográfico (GIS), el uso de estas tecnologías contribuye a una adecuada toma de decisiones, desde el punto de vista del manejo técnico-productivo, económico y ambiental; con la finalidad de identificar, analizar y modelar la variabilidad espacial y temporal de los cultivos agrícolas para poder manejarla de acuerdo a los objetivos productivos (Adewusi, y otros, 2024). De esta manera los avances en la AP han permitido mejorar considerablemente el nivel predictivo, a través de la investigación y desarrollo de los siguientes componentes: 1) La variabilidad espacial de rendimiento y calidad, 2) el uso de la teledetección en la agricultura y 3) la integración del Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI) sobre la calidad, rendimiento y aplicación específica del volumen foliar como indicador de vigor y expresión vegetativa al interior de un campo agrícola (Xue, 2017). El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición (por medio de sensores remotos) de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Sruthi & Mohammed, 2015). El NDVI se calcula a partir de la luz visible e infrarroja cercana (NIR: Near InfraRed) reflejada por la vegetación. La vegetación sana absorbe la mayor parte de la luz visible que la golpea, y refleja una gran parte de la luz infrarroja cercana. La vegetación con deficiencias de salud (ver Figura 1) refleja más luz visible y menos luz infrarroja cercana. Casi todos los índices satelitales de vegetación emplean esta fórmula de diferencia para cuantificar la densidad del crecimiento de la planta en la Tierra: donde el índice NDVI es igual a radiación infrarroja cercana menos radiación visible dividida por radiación infrarroja cercana más radiación visible (Zamani-Noor, 2022).

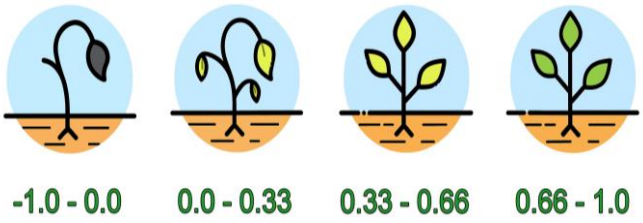


Figura 1 Valores del índice NDVI.

El resultado de esta fórmula se llama índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Escrito matemáticamente, la fórmula es: NDVI = (NIR – RED) (NIR + RED). Los cálculos de NDVI para un píxel dado siempre dan como resultado un número que va de menos uno (-1) a más uno (+1); sin embargo, ninguna hoja verde da un valor cercano a cero; ya que un cero significa que no hay vegetación y cerca de +1 (0.8 - 0.9) indica la mayor densidad posible de hojas verdes.

En este artículo se presenta una aplicación diseñada para dispositivos móviles que es capaz de obtener el índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) para conocer el estado de salud de una sección del cultivo, denominada NDVICam (Gama-Moreno, Plazola-Soltero, Murguia-Vadillo, Martínez-Hernández, & López-Carrillo, 2022). Esta aplicación es capaz de obtener el índice NDVI al procesar dos imágenes del mismo objetivo (una imagen en formato RGB y otra bajo el espectro infrarrojo cercano), mediante el uso de una cámara modificada adaptada con dos lentes para capturar ambos espectros y así calcular el índice NDVI justo donde se encuentra el objetivo. NDVICam está desarrollada para las principales plataformas móviles como son Android e iOS, así como también para equipos de escritorio como Windows y MacOS. NDVICam permite a los agricultores, capturar las imágenes de la planta, procesarlas y obtener el índice NDVI "in-situ". Asimismo, se obtiene un índice para determinar el nivel de nitrógeno (en el futuro se pretenden otros nutrientes como el fósforo).

Se experimentó con plántulas de camote de cerro (*Dioscorea remotiflora*) iluminadas con LEDs. Los cultivos in vitro iluminados con LEDs utilizan diodos emisores de luz como fuente de iluminación artificial para optimizar el crecimiento y desarrollo de tejidos vegetales bajo condiciones controladas (Talib, 2020). Los LEDs ofrecen ventajas frente a las lámparas fluorescentes tradicionales, como bajo consumo energético, menor emisión de calor y la posibilidad de ajustar el espectro de iluminación (rojo, azul, verde o combinaciones específicas) para estimular procesos fisiológicos concretos como la fotosíntesis, la morfogénesis o la acumulación de metabolitos secundarios (Stamford, Stevens, Mullineaux, & Lawson, 2023). Diversos estudios muestran que la proporción adecuada de luz roja y azul mejora la proliferación de brotes, el enraizamiento y la calidad de las plántulas cultivadas in vitro (Cebrat, Slupska, Prokopiuk, & Łukasik, 2025). En una investigación realizada en condiciones de invernadero reveló cómo la composición espectral de la luz influye en el crecimiento y la defensa de las plantas, señalando que la manipulación específica de la composición espectral de la luz mediante LEDs puede optimizar tanto la producción como la protección de cultivos (Lazzarin, y otros, 2021).

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. En la sección de "Materiales y procedimientos" se describe la metodología para el procesamiento de las imágenes, desde la captura de las imágenes RGB e infrarroja, hasta la generación de los índices NDVI. En la sección de "Experimentos y resultados" se muestra el resultado e interpretación del proceso de NDVI aplicado al camote de cerro. Finalmente se presentan las conclusiones.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

2.1 Cámara multiespectral

NDVICam se compone de dos elementos principales los cuales son: 1) una cámara con lente dual modificada para capturar imágenes que consta de dos lentes, uno para capturar imágenes del espectro infrarrojo y otro lente normal para capturar los colores RGB, como se ilustra en la Figura 2(A); y 2) una aplicación para dispositivos móviles desarrollada bajo la plataforma multidispositivo denominada Firemonkey y compilada para las principales plataformas móviles tales como Android e iOS, así como para sistemas operativos de escritorio tales como Windows y MacOS, como se muestra en la Figura 2(B).

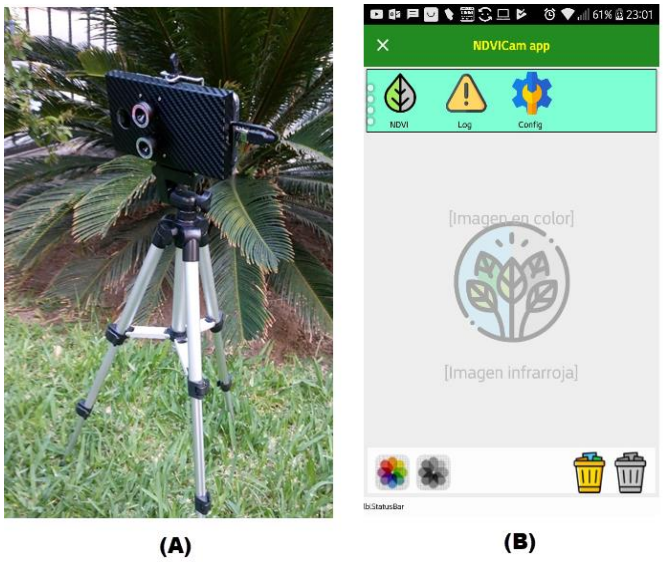


Figura 2 Elementos que componen a NDVICam.

2.2 Procesamiento para obtener el índice NDVI

Para obtener el índice NDVI, se capturan las imágenes con la cámara multiespectral, y la aplicación NDVICam procesa ambas imágenes: RGB e Infrarroja (ver Figura 3-A), leyendo cada valor de pixel rojo de ambas imágenes. El resultado es una matriz de valores flotantes en el rango de -1 a +1 creando una imagen según la escala de colores conocida como "El rango de valores NDVI" (ver Figura 3-B).

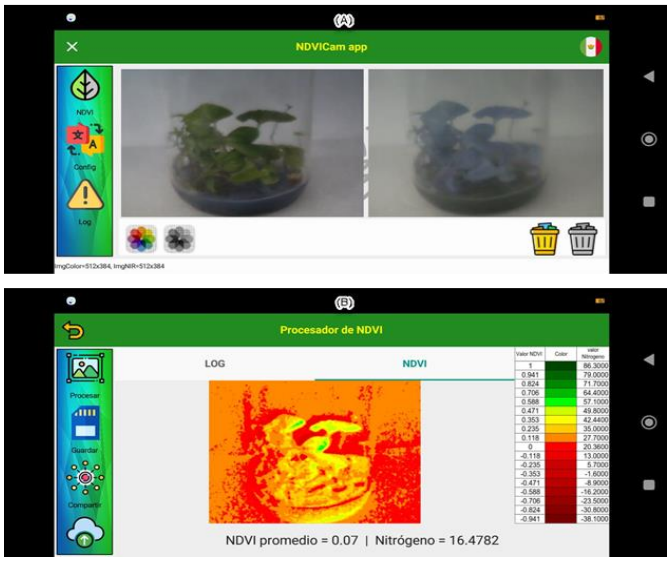


Figura 3 Obteniendo el índice NDVI.

El resultado de esta matriz es representado por un patrón de colores como el que se muestra en la Figura 3-B, donde es posible visualizar las zonas con colores "rojizos" que indican

que en esa región de la imagen no hay presencia de vegetación; y los colores "amarillentos" representan rangos de valores entre +0.2 a +0.3 indicando que la planta presenta deficiencia de nutrientes en esas zonas (Bhandari, 2012).

NDVICam además obtiene un valor de Nitrógeno, mismo que es calculado en base a una correlación de los valores obtenidos mediante el proceso del NDVI y un dispositivo medidor modelo SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development), esta herramienta permite estimar el nivel de nitrógeno en las plantas, ya que el contenido de clorofila está estrechamente correlacionado con la cantidad de nitrógeno en la hoja. Finalmente, es recomendable medir las unidades NDVI en el cultivo de interés con diferentes hábitos de crecimiento, diferentes estados fenológicos y niveles de nutrición para obtener regresiones que puedan utilizarse en invernadero y campo. La Figura 3-B muestra un valor de Nitrógeno de 16.4782 unidades en la toma realizada a la planta mostrada en las imágenes de la app. Esta medida es muy útil para que el agricultor pueda realizar los ajustes tanto de iluminación, como de humedad, nutrientes, entre otros.

3. EXPERIMIENTOS Y RESULTADOS

3.1 Experimentos con plántulas de camote de cerro

En este estudio se utilizaron plantas de camote de cerro (*Dioscorea remotiflora*), obtenidas a partir de plántulas cultivadas en condiciones in vitro. Se seleccionaron fragmentos de tallo con 4 nudos, los cuales se establecieron en frascos de vidrio con medio de cultivo MS (Murashige, 1962) suplementado con 0.5mg/L de bencilaminopurina (BAP), 30g/L de sacarosa, carbón activado (1 g/L) y 4g/L de gelrite. Se ajusto el pH de medio a 5.8 y se esterilizó el medio de cultivo.

Tabla 1 Composición de la calidad de luz

Luz LED	Calidad de luz	T1 (blanca)	T2 (Violeta)	T3 (Azul)	T4 (Roja)
450-455nm	Luz azul		22.22	100	
395-400nm	Luz violeta		0.93		
600nm	Luz naranja		0.93		
620-625nm	Luz rojo visible		63.89		100
720-730nm	Luz roja lejano		0.93		
400-700nm	Luz blanca	100	11.11		

El desarrollo de las plantas fue evaluado a los 60 días, todos los tratamientos se mantuvieron en condiciones de fotoperiodo de 16 horas luz con una densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) se mantuvo aproximadamente a 20 µmol/m2/s en diferentes calidades de luz visible (ver Tabla 1), luz LED tipo COB (Por sus siglas en inglés *Chip-on-board*) con base G4 (Figura 4-A) T1: (control) Luz LED blanca, T2: Luz LED violeta (Figura 4-B), T3. Luz LED azul (Figura 4-C), T4. Luz LED roja (Figura 4-D), a una temperatura de 25±2°C.

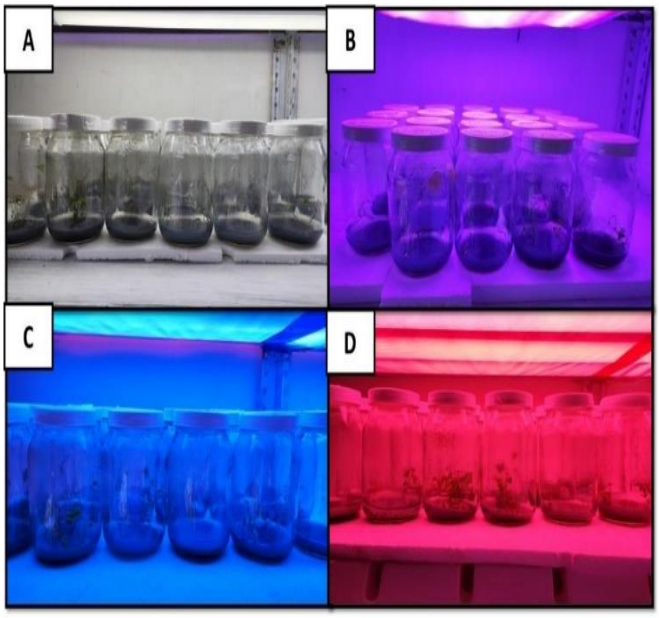


Figura 4 Plántulas de camote de cerro en diferentes calidades de luz (Propia). A) Luz blanca, B) Luz violeta, C) Luz azul, D) Luz roja.

Los datos recopilados se organizaron en la Tabla 2 para analizar el impacto de las diferentes calidades de luz LED en el crecimiento de las plántulas de camote in vitro. Se evaluaron los siguientes parámetros de desarrollo: número de hojas (NH), número de brotes (NB), número de nudos (NN), longitud de explante (LE), número de raíces (NR) y longitud de raíces (LR). Se empleo el diseño experimental completamente al azar, en cada tratamiento se realizaron 35 repeticiones, con dos plantas por repetición. Los datos fueron sujetos a un análisis de varianza (ANOVA). La comparación de medias fue determinada por la prueba de LSD ($P<0.05$).

Tabla 2 Evaluación de parámetros de desarrollo en plántulas de camote de cerro a los 60 días.

Tratamiento	*T1 (Blanca)*	*T2 (Violeta)*	*T3 Azul)*	*T4 (Rojo)*
*NH**	*7.99±0.53B*	*10.24±0.59A*	*6.35±0.46C*	*5.46±0.38C*
*NB**	*2.39±0.30B*	*2.34±0.16B*	*2.50±0.21B*	*3.52± 0.32A*
*NN**	*5.29±0.23AB*	*5.36±0.21A*	*4.75±0.19B*	*4.88±0.16AB*
LE [cm]*	*4.22±0.25^a*	*3.82±0.25^a*	*4.12±0.19^a*	*4.40±º0.22^a*
*NR**	*2.20±0.31A*	*1.89±0.27AB*	*1.07±0.17BC*	*1.30±0.17C*
LR [cm]*	*1.07±0.14A*	*1.41±0.17A*	*0.96±0.15A*	*1.18±0.19A*

En diversas investigaciones se menciona que la luz violeta (combinación de luz roja y luz azul) ha favorecido un notable desarrollo en el número de hojas, número de raíces, longitud de raíz y número de nudos en plantas (Gonzalías, 2016) (Stamford, Stevens, Mullineaux, & Lawson, 2023). Por lo tanto, si se mantienen condiciones de iluminación adecuadas y se optimiza la longitud de onda de la luz violeta, es posible obtener plantas con un buen desarrollo tanto foliar como radicular, como se mostró en la Tabla 2. Cabe mencionar que el tratamiento T4 (luz roja) mostró valores muy bajos en los parámetros de NH y NR.

3.2 Procesamiento de NDVI al Camote de cerro

Se obtuvieron las imágenes de la planta de camote de cerro en los espectros Infrarrojo Cercano (IRC) y de colores (RGB) para obtener el índice de vegetación NDVI con el prototipo de cámara dual descrito en la sección 2.1, y procesadas con la aplicación NDVIcam descrita en la sección 2.2. En la Figura 5-A se ilustra una imagen en el espectro de colores (RGB) de la planta del camote de cerro a los 180 días y en la Figura 5-B se muestra la imagen en el espectro infrarrojo cercano (IRC) de la misma planta. Es importante que las imágenes coincidan en posición y tamaño para que el algoritmo de la app NDVIcam sea capaz de procesar la imagen para obtener un resultado preciso de la escala de NDVI en las diferentes zonas de la planta.

Figura 5 Imágenes RGB e IRC del camote de cerro.

En la Figura 6 se obtiene una imagen en la escala de colores del índice NDVI. Donde los colores rojos representan zonas donde no hay vida (a menos que una parte de la planta esté muerta) y las zonas amarillentas a verde representan el estado de salud de la planta donde un valor cercano a 0 representa una planta con deficiencia de nutrientes, mientras que valores cercanos a 1 (ideales) representan un estado favorable de salud de la planta.

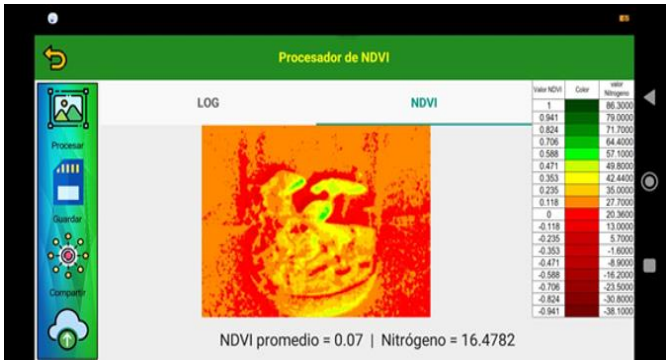
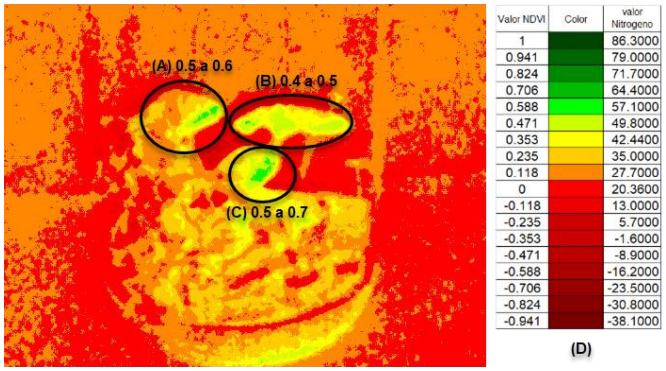


Figura 6 Obteniendo NDVI y Nitrógeno.

En la Figura 7 se muestran los diferentes rangos de valores del índice NDVI obtenidos con la app NDVIcam a la planta camote de cerro, que se describen a continuación. En la región (A) de la Figura 7, se observa que la plántula presenta una ligera reflectancia de color verde en sus hojas y que en base a la escala de colores del NDVI que se ilustra en la Figura 7-D, indica que la planta muestra signos de presencia de vida o que esa región tiene los suficientes nutrientes para prosperar (valores en el rango de 0.5 a 0.6). En la región (B) de la Figura 7 se observa reflectancia de las hojas, aunque a un nivel ligeramente bajo en un rango del 0.4 al 0.5 en la escala del NDVI.

Finalmente, el resultado que se observa en la región (C) de la Figura 7, muestra la región más sana que tiene la planta, cuyos valores oscilan entre 0.5 a 0.7 según el resultado obtenido por el análisis con la app NDVIcam. Estos resultados muestran que la plántula en observación se encuentra desarrollándose adecuadamente bajo las condiciones de iluminación y configuración de los LEDs descrita en la sección de experimentos, aunque presenta índices bajos de NDVI, esto coincide con algunos estudios realizados en la evaluación integral de eficacia de los índices de vegetación de teledetección satelital, en el que indican que en la etapa inicial de crecimiento de las plantas, se presentan valores más bajos de NDVI y a medida que incrementa el crecimiento, aumenta el valor del índice NDVI (Wang, y otros, 2024).



Valor NDVI	Color	valor Nitrogeno
1		86.3000
0.941		79.0000
0.824		71.7000
0.706		64.4000
0.588		57.1000
0.471		49.8000
0.353		42.4400
0.235		35.0000
0.118		27.7000
0		20.3600
-0.118		13.0000
-0.235		5.7000
-0.353		-1.6000
-0.471		-8.9000
-0.588		-16.2000
-0.706		-23.5000
-0.824		-30.8000
-0.941		-38.1000

Figura 7 Valores de NDVI por zonas de la planta.

En diversos trabajos se han empleado dispositivos para medir el contenido de clorofila y el NDVI para determinar la salud de las plantas informando sobre posibles plagas, enfermedades (Grishina, 2024) o prácticas inadecuadas de riego y/o fertilización, causando una disminución en el contenido de clorofila (Freidenreich, 2019). Actualmente existen pocos estudios de propagación in vitro que utilicen como herramienta el NDVI, como seguimiento del índice de salud de la planta, dentro de estas investigaciones se encuentra la micropropagación y aclimatación de orquídeas, en el que se analizaron los valores de contenido de clorofila y NDVI para determinar la salud de las plantas en proceso de aclimatación, variando el sustrato empleado para dicho efecto (Mullin, 2022).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el estudio del crecimiento de la planta camote de cerro (*Dioscorea remotiflora*) en un ambiente controlado, con iluminación basada en LEDs. Se observó en las pruebas realizadas que con luz violeta se obtienen mejores resultados, seguidos de la luz blanca y la luz azul; y, por el contrario, la luz roja fue la que presentó los resultados menos favorables. Demostrando los efectos positivos en varios parámetros de desarrollo de las plántulas de camote de cerro, incluyendo el número de hojas, raíces y nudos, por lo que es recomendable considerar el uso combinado de la luz violeta y la luz blanca para optimizar la propagación y el establecimiento de estas plántulas en condiciones controladas en sistemas de cultivo in vitro, haciendo uso de la tecnología de iluminación LED. Dependiendo el color de la luz LED la planta puede presentar

diferentes resultados, como pueden ser, un mayor verdor en las hojas, mayor tamaño y un crecimiento más acelerado. De igual manera, se presentó el uso de una aplicación para dispositivos móviles que le permite a los usuarios determinar el índice NDVI de las plantas y confirmar el progreso de las mismas según los resultados del procesamiento de imágenes multiespectrales. Las ventajas de usar la cámara dual y la app NDVICam, es que le permiten al usuario conocer el estado de salud de sus cultivos, con métodos "no-invasivos" y con dispositivos de bajo costo y de uso diario como su teléfono móvil, que le permita tomar decisiones directamente en el campo en cualquier momento y en cualquier lugar. Finalmente, el ahorro energético que ofrece la tecnología de iluminación LED ya es medible y considerable, y existen nuevas oportunidades para mejorar la eficacia de la fuente LED y la eficiencia de los productos de iluminación más avanzados.

REFERENCIAS

Adewusi, A. O., Asuzu, O. F., Olorunsogo, T., Iwuanyanwu, C., Adaga, E., & Daraojimba, D. O. (2024). AI in precision agriculture: A review of technologies for sustainable farming practices. *World Journal of Advanced Research and Reviews, 21(01)*, 2276-2285. doi:https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0314

Bhandari, K. A. (2012). Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *Procedia Technology, 6*, 612 - 621.

Cebrat, M., Slupska, B., Prokopiuk, B., & Łukasik, Ł. (2025). Influence of LED Light Spectra on Morphogenesis, Secondary Metabolite Production and Antioxidant Potential in Eucomis autumnalis Cultured In Vitro. *Agronomy, 15(9)*, 2197. doi:https://doi.org/10.3390/agronomy15092197

Freidenreich, A. B. (2019). Precision Agriculture Application for Sustainable Nitrogen Management of Justicia brandegeana Using Optical Sensor Technology. *Agriculture, 9(5)*, 98. doi:https://doi.org/10.3390/agricult

Gama-Moreno, L. A., Plazola-Soltero, V. H., Murguia-Vadillo, C. G., Martínez-Hernández, C., & López-Carrillo, E. (2022). Prototipo de Cámara Infrarroja para obtener el Indice NDVI en Agricultura de Precisión. *Revista Programación Matemática y Software, Vol. 14.*(1), pp. 9-21. ISSN (e): 2007-3283. Indexada por LatinIndex. Obtenido de http://www.progmat.uaem.mx:8080/Vol14num1/vol14no1art2.pdf

Gonzalías, Y. R. (2016). Desarrollo de un sistema de iluminacion artificial LED para cultivos en interiores-Vertical Farming(VF). *Informador Tecnico* , 111-120.

Grishina, A. S. (2024). Detección de infecciones en plantas: Perspectivas para la imagenología por fluorescencia de clorofila. *Agronomía, 14(11)*, 2600. doi:https://doi.org/10.3390/agronomy14112600

Lazzarin, M., Meisenburg, M., Meijer, D., Van Ieperen, W., Marcelis, L. F., Kappers, A. R., . . . Dicke, M. (2021). LEDs make it resilient: effects on plant growth and defense. *Trends in Plant Science*.

Mullin, A. C. (2022). Conservation Horticulture: In Vitro Micropropagation and Acclimatization of Selected Florida Native Orchids. *HortScience, 57(9)*, 1159-1166. doi:https://doi.org/10.21273/HORTSCI16

Murashige, T. a. (1962). A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiol*, 473-497.

Sruthi, S., & Mohammed, A. M. (2015). Agricultural drought ana. using the NDVI. *Aquatic Procedia*, pp. 1258–1264.

Stamford, J. D., Stevens, J., Mullineaux, P. M., & Lawson, T. (2023). LED Lighting: A Grower's Guide to Light Spectra. *HortScience*, 180-196. doi:10.21273

Talib, N. J. (2020). Effect of Light Emitting Diode (LED) Spectra on Plant Growth. *Advances in Agricultural and Food Research Journal*.

Wang, C., Lu, L., Zhou, Y., Liu, X., Wu, J., Tan, W., & Xiong, X. (2024). Comparison between Satellite Derived Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence, NDVI and kNDVI in Detecting Water Stress for Dense Vegetation across Southern China. *Remote Sensing, 16(10)*, 1735. doi:https://doi.org/10.3390/rs16101735

Xue, J. &. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors* .

Zamani-Noor, N. &. (2022). Monitoring Growth Status of Winter Oilseed Rape by NDVI and DNYI Derived from UAV- Based RED-GREEN-BLUE. *Imagery*, 2212.

Postharvest Efficiency and Cup Quality of Marsellesa Coffee Under Traditional Processing in Sierra Mixe, Oaxaca

José Uriel García-Domínguez*, Yuri Villegas-Aparicio*, Carlos Francisco Varapizuela-Sánchez, Aarón Martínez-Gutiérrez*, Vicente Arturo Velasco-Velasco*, Gustavo Omar Díaz-Zorrilla***

**Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233.*

(e-mail: {urielgarcia.jugd@gmail.com, yuriva1968@gmail.com, aaron_0715@hotmail.com, vicvel5@hotmail.com, gustavo.dz@voaxaca.tecnm.mx}).

***Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnologico de Oaxaca. Avenida Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125, esquina Calzada Tecnológico; 68030. Oaxaca, México.*

(e-mail: {carlosvarapizuela@gmail.com}).

Abstract: The Marsellesa variety (Villa Sarchí × Timor Hybrid) is valued for its resistance to *Hemileia vastatrix*, yet its postharvest efficiency and cup quality under artisanal management require quantitative evidence. This study measured mass conversion along the processing sequence—cherry → parchment → green → roasted and ground—and assessed sensory performance following the Specialty Coffee Association protocol. Six traditional plots were evaluated in the Sierra Mixe, Oaxaca, with a sample of 156 plants (26 per plot). We recorded weights (mass) at each stage, verified harvest maturity via soluble solids and the proportion of fully red cherries, conducted fermentation in open tanks for ≈12 h at 20–22 °C, and subsequently washed and sun–shade dried to ≈12% moisture in parchment. Yields were calculated per plant and extrapolated per hectare; processing stages were compared using the Friedman test with Dunn's post hoc analysis. We observed an average ratio of ≈6.5 kg of cherry per 1 kg of roasted and ground coffee; extrapolated yields per hectare were ≈3,630 kg (cherry), ~813 kg (parchment), ~658 kg (green), and ~561 kg (roasted and ground), with moderate variability among plots. The best sensory lot scored 81 points, with cleanliness and sweetness as standout attributes; the remaining lots averaged ~79 points with a slight fermentation note. Overall, the artisanal process exhibited technical stability and a practical conversion rule for planning. Standardizing harvest maturity, fermentation, and drying is likely to increase yields, stabilize sensory consistency, and enable quality-based differentiation.

Keywords: sustainable agroindustrial processes, mass balance, quality-based value, process control, traceability

1. INTRODUCCIÓN

La poscosecha del café en sistemas tradicionales representa una oportunidad estratégica para mejorar la calidad en taza. En contextos de baja tecnificación (Aragón-Guzmán et al., 2024), las operaciones unitarias —cosecha, despulpado, fermentación, lavado, secado, trilla y tostado— suelen ejecutarse con criterios empíricos, lo que introduce variabilidad lote a lote y dificulta la planeación productiva. La variedad Marsellesa (Villa Sarchí × Híbrido de Timor), adoptada por su resistencia a *Hemileia vastatrix (*WCR*,* 2018*)*, se ha difundido en regiones como la Sierra Mixe, con alta presencia de pequeños productores (García-Domínguez et al., 2021); no obstante, existe escasa evidencia cuantitativa sobre su eficiencia de conversión y la consistencia sensorial cuando se procesa bajo prácticas artesanales.

Desde el marco de la ingeniería de procesos, el problema se formula como la estimación y estabilización de las tasas de conversión a lo largo del tren de proceso (cereza→pergamino→verde→tostado/molido), modeladas mediante balances de masa y desagregadas en rendimientos por etapa. Complementariamente, se emplea control estadístico del proceso para identificar variables críticas de calidad y variabilidad entre lotes, y se utiliza la evaluación sensorial con protocolo de la Specialty Coffee Association como salida de desempeño del sistema. Este enfoque permite relacionar decisiones operativas (madurez a cosecha, ventana tiempo–temperatura de fermentación y régimen de secado) con efectos multiplicativos sobre el rendimiento global y la calidad en taza.

Este trabajo se ubica en procesos agroindustriales sostenibles: la cuantificación de rendimientos, la estandarización de Puntos

Críticos de Control (PCC) y la trazabilidad por lote actúan como palancas de eficiencia de recursos, calidad consistente y reducción de pérdidas, en línea con la agricultura sustentable, la economía circular (aprovechamiento y control de subproductos) y la transición ecológica en sistemas de pequeña escala. La selección y trazabilidad varietal han sido enfatizadas en guías regionales de referencia (Velásquez O., 2021). Los indicadores propuestos son transferibles a formación y extensión (educación para el desarrollo sustentable) y a modelos de negocio sostenibles centrados en calidad y trazabilidad. Experiencias regionales muestran la viabilidad de estrategias basadas en trazabilidad y calidad (Jáuregui-Arenas et al., 2017).

1.1 Planteamiento del problema y objetivos

Problema. ¿Cómo se comportan las tasas de conversión y la calidad sensorial del café Marsellesa bajo manejo artesanal, y qué PCC permiten estabilizar el rendimiento global y la consistencia de la taza?

Marco teórico. Ingeniería de procesos (balance de masa y desagregación por etapas), control estadístico del proceso para la variabilidad entre lotes y evaluación sensorial como métrica de salida.

Objetivo general. Estimar los rendimientos por fase y el rendimiento global; caracterizar la calidad sensorial; e identificar controles operativos que aumenten la eficiencia y la consistencia.

2. METODOLOGÍA

La presente es un estudio exploratorio con enfoque de ingeniería de procesos para cuantificar conversiones de masa en el tren cereza→pergamino→verde→tostado/molido y caracterizar la calidad en taza bajo procesamiento artesanal.

2.1 Ubicación y diseño del estudio

Sitio: Sierra Mixe, Oaxaca, México (17°03'04"N 95°52'22"W); seis parcelas tradicionales (bloques), n = 156 plantas (26 por parcela) con manejo agronómico no tecnificado y densidad referencial de 3,300 plantas/ha. Periodo de campo: ciclo 2025 (cosecha y beneficio húmedo). La selección de parcelas fue por conveniencia (criterios: presencia de Marsellesa, manejo tradicional, superficies ~0.8–1.2 ha). Se estableció trazabilidad por lote: parcela–fecha–proceso.

2.2 Materiales, equipo y software

- Medición de masa: báscula digital certificada 40 kg.
- Madurez: refractómetro digital 0–32 °Brix (aprox. % m/m de sólidos solubles) y conteo de % cereza roja.
- Beneficio húmedo: despulpadora mecánica ≈5.2 kW (7 HP); fermentación en tanque abierto bajo sombra.
- Secado: sol–sombra con volteo; liberación a 12 % de humedad en pergamino.
- Etapas posteriores: trilla, tostado y molienda por maquila comercial con registro de pesos.
- Calidad sensorial: Q-Grader, protocolo Specialty Coffee Association (escala 0–100).
- Análisis estadístico: R 4.3.2 (descriptivos, no paramétricas, bootstrap).

2.3 Procedimiento (operaciones unitarias y PCC)

- Cosecha selectiva por madurez: recolección de cereza con verificación de °Brix y % roja.
- Despulpado ≤6 h postcosecha.
- Fermentación: ~12 h a 20–22 °C (verificación de fin por prueba operativa); PCC 1: ventana tiempo–temperatura.
- Lavado y oreado.
- Secado mixto (dos días sol, luego sombra; volteos programados) hasta H ≈ 0.12 en pergamino; PCC 2: curva y humedad objetivo.
- Trilla → verde; tostado/molido; PCC 3: control de liberación (humedad y defectos).

2.4 Variables y criterios de calidad

- Variables de proceso (por lote): masas m_cc (cereza), m_cps (pergamino), m_go (verde), m_tm (tostado/molido); °Brix; tiempos; T/RH ambiente; humedad en pergamino.
- Salida sensorial: puntaje total y atributos (aroma, acidez, cuerpo, dulzor, uniformidad, limpieza).
- Liberación de lote: humedad objetivo (12 % pergamino) y defectos físicos dentro de tolerancia.

2.5 Métricas de desempeño y ecuaciones

Ec. 1 (rendimientos globales respecto a cereza)

$$r_{cps} = \frac{m_{cps}}{m_{cc}}, r_{go} = \frac{m_{go}}{m_{cc}}, r_{tm} = \frac{m_{tm}}{m_{cc}} \quad (1)$$

Ec. 2 (rendimientos por etapa y composición multiplicativa)

$$s_1 = \frac{m_{cps}}{m_{cc}}, s_2 = \frac{m_{go}}{m_{cps}}, s_3 = \frac{m_{tm}}{m_{go}}, r_{tm} = s_1\, s_2\, s_3 \quad (2)$$

Ec. 3 (balance con humedad)

$$m_k = m_{k,seco} + m_{k,agua}, m_{k,seco} = m_k\,(1 - MC_k) \quad (3)$$

Los símbolos empleados se definen en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura (símbolos y unidades SI)

Símbolo	Definición	Unidad (SI)
m_cc	Masa de café en cereza (lote)	kg
m_cps	Masa en pergamino seco (CPS)	kg
m_go	Masa de grano oro (verde)	kg
m_tm	Masa de café tostado y molido	kg
m_k, seco	Masa seca de la fase k	kg
m_k, agua	Masa de agua de la fase k	kg
MC_k	Fracción de humedad de la fase k	—
H	Humedad objetivo en pergamino (fracción)	—
r_cps	Rendimiento global respecto a cereza (cereza→pergamino)	—
r_go	Rendimiento global respecto a cereza (cereza→verde)	—
r_tm	Rendimiento global respecto a cereza (cereza→tostado/molido)	—

s_1	Rendimiento por etapa (cereza→pergamino)	—
s_2	Rendimiento por etapa (pergamino→verde)	—
s_3	Rendimiento por etapa (verde→tostado/molido)	—
T	Temperatura de proceso/ambiente	°C
RH	Humedad relativa del aire	%
t	Tiempo de proceso	h
°Brix	Sólidos solubles en pulpa (aprox. % m/m)	% (m/m)
μ	Media muestral	—
σ	Desviación estándar	—
SE	Error estándar de la media	—
CV	Coeficiente de variación (σ/μ)	—
p	Valor de significancia (pruebas)	—
IC 95 %	Intervalo de confianza al 95 %	—
LSL, USL	Límites de especificación inferior/superior	—
C_p	Índice de capacidad del proceso	—
C_pk	Índice de capacidad (centrado)	—
n	Tamaño de muestra	—
kg·ha⁻¹	Rendimiento por superficie	kg·ha⁻¹
P_eq	Potencia de equipo (despulpadora)	kW

2.6 Análisis estadístico

- Descripción: medias, medianas, rangos intercuartílicos (RIQ), intervalos de confianza, errores estándar y coeficientes de variación, por parcela y por fase.
- Pruebas de hipótesis: evaluación de normalidad (Shapiro–Wilk) y comparación entre fases con Friedman (mediciones repetidas por bloque) + post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni.
- Incertidumbre: intervalos por bootstrap para r_{tm} y s_1
- Escalamiento: extrapolación a kg·ha⁻¹ con densidad observada (3,300 plantas/ha).

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los pesos registrados por fase se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Pesos por parcela y fase del proceso (kg).

Parcela	Cereza (kg)	Pergamino seco (kg	Oro (kg)	Tostado/molido (kg)
1	33.8	7.57	6.13	5.22
2	28.6	6.4	5.19	4.42
3	18.2	4.08	3.3	2.81
4	39	8.73	7.07	6.03
5	15.6	3.49	2.83	2.41
6	36.4	8.15	6.6	5.62

3.1 Desempeño de conversión y balance de masa

El tren de proceso mostró mermas sistemáticas por etapa, en línea con revisiones de poscosecha (Ghosh y Venkatachalapathy, 2014). Los valores por fase mostraron variabilidad interparcela moderada (CV ≈ 34% en todas las etapas). Medias por parcela (kg ± EE; CV%): cereza 28.6 ± 4.0 (34), pergamino 6.40 ± 0.89 (34), oro 5.19 ± 0.72 (34) y tostado/molido 4.42 ± 0.61 (34). Intervalos de confianza al 95%: 18.39–38.81, 4.12–8.69, 3.34–7.04 y 2.84–6.00 kg, respectivamente. Medianas [RIQ]: 31.2 [20.8–35.8], 6.98 [4.66–8.01], 5.66 [3.77–6.48] y 4.82 [3.21–5.52].

Las diferencias entre etapas fueron significativas (Friedman $\chi^2(3) = 18.0$, $p = 0.00044$; Kendall's $W = 1.00$), y los contrastes de Dunn–Bonferroni indicaron cereza > (pergamino ≥ oro ≈ tostado/molido).

Los rendimientos por etapa fueron $s_1 = 0.2239$(cereza→pergamino), $s_2 = 0.8100$(pergamino→oro) y $s_3 = 0.8518$(oro→tostado) (n = 6), evidenciando que la mayor merma ocurre en la primera transición.

La conversión cereza:tostado fue 6.473 ± 0.004 (DE; CV = 0.06%), equivalente a $r_{ct} = \frac{\text{tostado}}{\text{cereza}} = 0.15448$($IC_{95\%}$ 0.15439–0.15457), lo que evidencia una regla operativa robusta para planeación y costeo. Con base en estos parámetros, la estandarización de los puntos de control — madurez de cosecha, ventana tiempo–temperatura de fermentación y régimen de secado— es previsible que incremente las conversiones por etapa, mejore el rendimiento global y estabilice la consistencia sensorial en sistemas tradicionales.

Los rendimientos extrapolados (kg·ha⁻¹): ≈3,630 (cereza), ≈813 (pergamino), ≈658 (verde) y ≈561 (tostado/molido), con variabilidad interparcela moderada (≈30–35 %). Las diferencias por fase fueron significativas (Friedman, $p<0.01$ y los contrastes Dunn–Bonferroni indicaron cereza > (pergamino ≥ verde ≈ tostado/molido), consistentes con los valores por hectárea (Fig. 1).

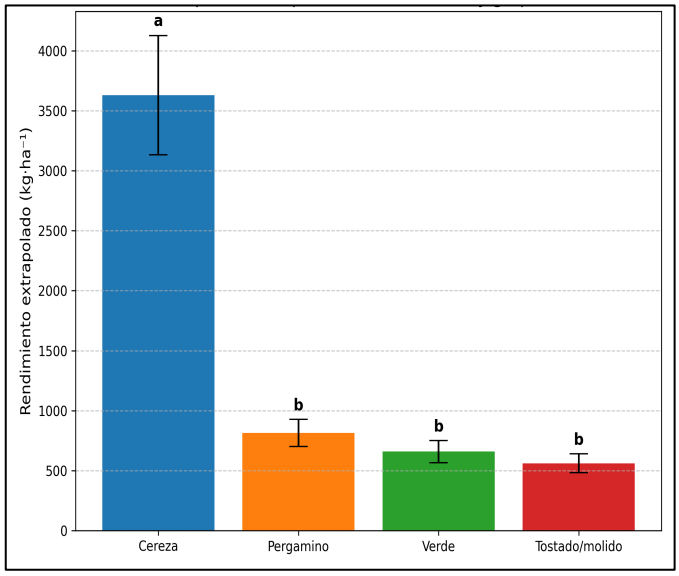


Fig. 1. Rendimiento (kg·ha⁻¹), medias ± EE (n=6). Letras distintas: diferencias significativas (Friedman + Dunn–Bonferroni, $p<0.05$).

3.2 Calidad sensorial

El perfil sensorial del mejor lote fue de 81 puntos SCA frente al promedio de los restantes ~79. El lote sobresaliente superó al promedio en fragancia/aroma, sabor, acidez y cuerpo, y

mostró ventaja clara en taza limpia, uniformidad y dulzor, atributos que alcanzaron valores máximos en la cata (Tabla 3).

Tabla 3. Evaluación sensorial del mejor lote, expresada en puntajes por atributo (escala 0–10) y total (Specialty Coffee Association).

Atributo	Calificación	Notas
Aroma/fragancia	7.5	Corta; frutos de hueso; piña
Sabor	7.5	Caramelo; toronja
Sabor de boca	7	Suave; fermentado; terroso
Acidez	7.5	Cítrica; toronja muy leve
Cuerpo	7.25	Cuerpo medio
Balance	7	Poco balanceado
Uniformidad	10	Uniforme
Taza limpia	10	Todas las tazas limpias
Dulzor	10	Caramelo; mantequilla
General (catador)	7.25	Nota sucia y fermento
TOTAL	**81**	

El perfil de descriptores (Fig. 2) agrupa las percepciones en familias dominantes: dulce, frutal y chocolate, lo que refleja un perfil típico de cafés lavados de la región. La intensidad relativa de cada descriptor se visualiza en el radar sensorial, donde el mejor lote mostró mayor expresión en dulzor y balance, atributos clave para la diferenciación en sistemas tradicionales.

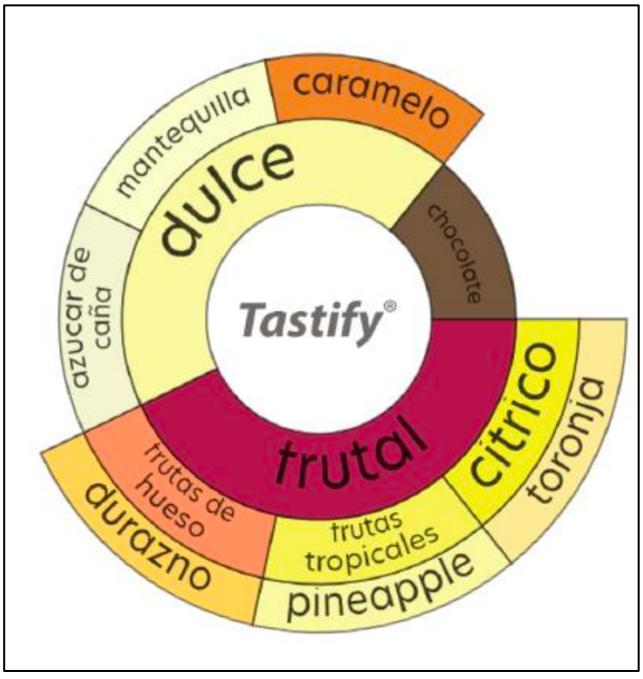


Fig. 2. Perfil de descriptores por familias sensoriales en café Marsellesa (lote destacado).

La humedad en pergamino operó como característica crítica de calidad: mantenerla en la banda objetivo ≈12 % se asoció con mayor consistencia sensorial (menor variabilidad entre tazas) y menor incidencia de defectos. En términos operativos, el control de humedad—junto con la verificación de madurez de cosecha y la ventana tiempo–temperatura de fermentación—aporta estabilidad técnica y favorece la diferenciación por calidad en sistemas tradicionales.

3.3 Sensibilidad y PCC

La descomposición multiplicativa $r_{tm} = s_1 s_2 s_3$ (Ec. 2) sugiere priorizar mejoras en s_2(pergamino→verde; lavado/trilla/fermentación con verificación de fin) y s_3(verde→tostado; control de humedad y liberación del lote), donde pequeñas ganancias se propagan al rendimiento global. Se confirman tres PCC operativos: madurez de cosecha (alta proporción de cereza roja y sólidos solubles en banda), ventana tiempo–temperatura de fermentación controlada y régimen de secado con curva registrada y meta de humedad. Su estandarización reduce la variabilidad, estabiliza la eficiencia y permite diferenciación por calidad en sistemas tradicionales.

Los efectos de tiempo y temperatura de fermentación sobre los atributos sensoriales están ampliamente documentados (Silva *et al.*, 2024) y el control del régimen de secado mediante soluciones solares/mixtas mejora estabilidad y tiempos (Meja *et al.*, 2025).

4. CONCLUSIONES

- El beneficio artesanal mostró estabilidad técnica con pérdidas previsibles por etapa y una regla operativa robusta de ≈6.47 kg de cereza por 1 kg de café tostado/molido, útil para planeación productiva y estimación de costos en sistemas tradicionales.
- Aunque el rendimiento actual no alcanza el umbral de rentabilidad, la regularidad observada indica un margen de mejora accionable sin tecnificación compleja: pequeñas mejoras por etapa se propagan y elevan el rendimiento global.
- La calidad en taza fue aceptable, con un lote en 81 puntos y promedios cercanos a 79 puntos; mantener la humedad en pergamino ≈12 % favorece la consistencia sensorial (limpieza, dulzor, balance) y reduce defectos.
- La estandarización de tres puntos de control — madurez de cosecha, ventana tiempo–temperatura de fermentación y régimen de secado— permite elevar las conversiones por etapa, estabilizar la eficiencia y diferenciar por calidad en sistemas de pequeña escala.
- Los insumos operativos generados (regla de conversión, indicadores de rendimiento por fase, criterios de liberación del lote por humedad y defectos, y trazabilidad por lote) constituyen una ruta de mejora continua alineada con procesos agroindustriales sostenibles.

Como trabajo futuro, la instrumentación básica (registro de temperatura y humedad, curvas de secado) permitirá consolidar estas mejoras y evaluar su impacto económico y sensorial en ciclos sucesivos.

REFERENCIAS

Aragón-Guzmán, S.E. et al. (2024) "A systematic literature review on environmental, agronomic, and socioeconomic factors for the integration of small-scale coffee producers into specialized markets in Oaxaca, Mexico", Frontiers in Sustainable Food Systems, 8, p. 1386956. Disponible en: https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1386956.

García-Domínguez, J.U. et al. (2021) "Descripción y análisis de productores de café de la región Mixe, Oaxaca", Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12(7), pp. 1235–1247. Disponible en: https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2781.

Ghosh, P. y Venkatachalapathy, N. (2014) "Processing and Drying of Coffee – A Review", International Journal of Engineering Research & Technology, pp. 784–794.

Jáuregui-Arenas, S. et al. (2017) "AGROEMPRESAS FAMILIARES DE CAFÉ (Coffea arabica L.) DIFERENCIADO Y DE ESPECIALIDAD EN VERACRUZ, MÉXICO: CASOS DE ÉXITO", 2017, 10(12), pp. 134–139.

Meja, E.M. et al. (2025) "Investigating the Performance and Optimization of Solar Coffee Drying Technologies—A Systematic Review", Journal of Food Processing and Preservation. Editado por M. Rebollo-Hernanz, 2025(1), p. 7907660. Disponible en: https://doi.org/10.1155/jfpp/7907660.

Silva, L.C.F. et al. (2024) "Enhancing Sensory Quality of Coffee: The Impact of Fermentation Techniques on Coffea arabica cv. Catiguá MG2", Foods, 13(5), p. 653. Disponible en: https://doi.org/10.3390/foods13050653.

Velásquez O., R.A. (2021) "Guía de variedades de café y selección de semilla". Asociación Nacional del Café - Anacafé-. Disponible en: https://www.anacafe.org/uploads/file/bb091944490b490482f329b0ea0ec6bd/Guia-variedades-y-seleccion-semilla.pdf.

WCR (2018) "Un catálogo global de variedades que abarca: Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Jamaica, Kenia, Malawi, Nicaragua, Panamá, Perú, República Dominicana, Rwanda, Uganda, Zambia, Zimbabue." World Coffee Research Portland, OR. Disponible en: https://worldcoffeeresearch.org/media/documents/las_variedades_del_cafe_arabica_v2_feb_2018.pdf (Consultado: el 22 de octubre de 2024).

ADAS Systems Prototyping: Distributed Architecture with eCAL Implemented on Raspberry Pi

Cárdenas Regalado, Jaqueline * **Morales Lira, Omar** * **González Pérez, Jose Luis** * **González Huitrón, Víctor Alejandro** * **Rodríguez Mata, Abraham Efraim****

* *Instituto Tecnológico de Querétaro, Av Tecnológico S/N, Centro Histórico, Centro, 76000 Santiago de Querétaro, Qro. (e-mail: l21140248, l21140267, jose.gp, victor.gh@queretaro.tecnm.mx).*
** *Instituto Tecnológico de Chihuahua, Av. Tecnológico 2909, Tecnológico, 31200 Chihuahua, Chih. (e-mail: abraham.rm@chihuahua.tecnm.mx)*

Abstract: This article introduces a modular distributed software platform designed for prototyping Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), built with Python and leveraging the eCAL (enhanced Communication Abstraction Layer) middleware. The system employs Google Protocol Buffers to define precise message schemas for publisher–subscriber modules, enabling efficient serialization, versioning support, and strong typing across networked components. The architecture is deployed across heterogeneous Raspberry Pi nodes (models 3, 4, and 5), running Lubuntu on Pi 3 and Ubuntu on Pi 4/5, while development and orchestration occur on an x86 Windows host. The testbed interconnects four Raspberry Pis and two laptops over a WLAN, capturing input from up to four cameras. Sensor data is streamed to a central Raspberry Pi 5 node for processing, and a Pi 3 with a touchscreen operates as a Human Machine Interface (HMI). The remaining Pi units function as distributed acquisition modules. The work describes hardware and network setup, communication topology, and message schema design. It also details the continuous integration and delivery (CI/CD) pipeline with automated unit testing, ensuring code quality and reproducibility. Performance evaluations analyze system latency, throughput, error handling, and scalability under realistic multi camera loads. The results demonstrate that commodity embedded hardware combined with open-source middleware can support robust prototyping of distributed perception systems. The platform's extensible design allows integration of additional sensors or compute nodes, facilitating experimental research in ADAS systems. The implementation, test results, and architectural insights aim to guide further developments in distributed systems and embedded software for automotive sensing applications

Keywords: Distributed Middleware, Protocol Buffers, Embedded Systems Prototyping, Multi-Node ADAS Platform.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) ha cobrado relevancia creciente debido a que ofrecen mejoras sustanciales en la seguridad vial, apoyo regulatorio en estándares de conducción automática parcial y alta demanda tecnológica para la percepción ultiples sensores, nodos de cómputo distribuidos y componentes de comunicación cooperen con baja latencia, sincronización precisa y alta fiabilidad, especialmente cuando se utiliza sistemas embebidos de bajo costo.

En trabajos recientes, se han explorado plataformas de referencia para pruebas de cámaras ADAS que buscan datos confiables para la validación en escenarios reales, considerando montajes de sensores, sincronización de relojes y rendimiento medido bajo distintas condiciones ambientales. En Rövid et al. (2025) se propone una plataforma de medición de referencia para sistemas de cámara ADAS que soporta la evaluación de sensores visuales en escenarios reales mediante cámara y LiDAR. Otro estudio, El Hafid et al. (2020), evalúa el procesamiento en tiempo real en vehículos autónomos pequeños, con sensores modestos, enfatizando los retos para el cumplimiento de las restricciones de tiempo durante el procesamiento en sistemas embebidos y el tiempo de respuesta de los actuadores. Adicionalmente, en Yigui et al. (2019) investigan enlaces de comunicación de alto rendimiento para controladores ADAS, explorando alternativas como enlaces seriales de alta velocidad implementados en FPGA, comparando ancho de banda y latencia frente a Ethernet para cumplir con los requerimientos de integración de unidades de cómputo intensivo.

Aunque hay iniciativas de prototipado con hardware accesible y software abierto, como en Valenzuela et al. (2024), persiste la necesidad de sistemas que integren múltiples fuentes de imagen, nodos de adquisición, interfaces de usuario, procesamiento centralizado, todo conectado e integrado mediante redes inalámbricas o alámbricas, manteniendo un rendimiento aceptable. El problema estudiado en este trabajo consiste en diseñar e implementar una plataforma distribuida para prototipado de sistemas ADAS, usando Raspberry Pi, eCAL como middleware de comunicación y Protocol Buffers para definir mensajes estructurados, Google (2025), con el fin de evaluar si es posible alcanzar baja latencia, sincronización de datos y un funcionamiento fiable con hardware de costo moderado.

Este trabajo reporta los avances hasta ahora: desarrollo del hardware y topología de red, diseño de los mensajes de comunicación, implementación sobre Raspberry Pi modelos 3, 4 y 5, pruebas preliminares de latencia y transmisión de múltiples cámaras simultáneas, además de la infraestructura de integración continua (CI/CD) y pruebas unitarias para asegurar la calidad del software. Los resultados parciales indican que la plataforma es viable para el prototipado de ADAS bajo condiciones razonables, aunque se identifican áreas de mejora para escenarios con mayor carga y exigencia en sincronización y rendimiento.

2. METODOLOGÍA

El proyecto se planteó como un prototipo funcional de plataforma distribuida para ADAS, con objetivos de caracterización de latencia, fiabilidad, sincronización y escalabilidad. El diseño del experimento asume una red local con nodos heterogéneos (Raspberry Pi de distintas generaciones) y un nodo central encargado de orquestar y procesar transmisiones desde múltiples cámaras. Se establece un diagrama 1 que representa la topología física y lógica del sistema, con un nodo central (RPI 5), nodos de adquisición (dos RPI 4), un nodo HMI (RPI 3) y el equipo de desarrollo externo conectado por WiFi.

Se definieron dos tipos de pruebas: (a) pruebas de rendimiento en condiciones controladas (por ejemplo, transmisión de flujos de video con tipos y niveles de compresión), y (b) pruebas de operación integrada (captura, transmisión, visualización y comandos HMI). En ambas se miden métricas de latencia (tiempo de ida y vuelta, retraso entre frames), pérdidas de paquetes, sincronización de sensores, carga de CPU/memoria en los nodos y duración de transferencia de mensajes.

2.1 Componentes de hardware y software

Los componentes empleados fueron:

- Nodo central: Raspberry Pi 5 con Ubuntu 24.04 LTS ARM, 8 GB de RAM, unidad SSD M.2 de 512 GB.
- Nodos de adquisición: dos Raspberry Pi 4 modelo B, cada uno con 4 GB de RAM y tarjeta microSD de 512 GB, sistema operativo Ubuntu 24.04 ARM.
- Nodo HMI: Raspberry Pi3 con 1GB de RAM y microSD de 256GB, ejecutando Lubuntu 24.04 ARM, conectado a una pantalla táctil de 7 pulgadas (resolución 800×480).

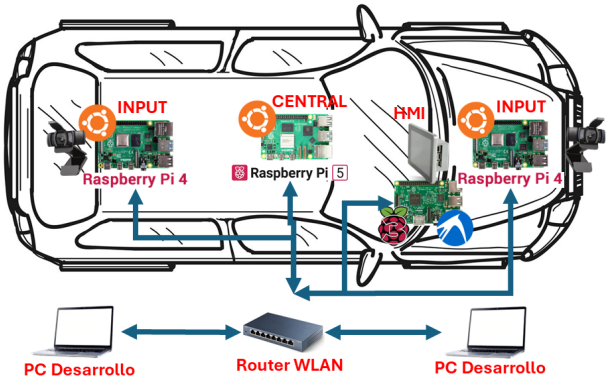


Fig. 1. Esquema de la plataforma desarrollada

- Red local: todos los nodos, excepto el equipo de desarrollo, conectados por Ethernet a un router; el equipo de desarrollo (Windows 11 x86) conectado por WiFi.
- Lenguaje de desarrollo: Python (3.12).
- Middleware: eCAL Eclipse versión 5.13; las versiones ARM de eCAL fueron compiladas desde código fuente para cada modelo de Raspberry Pi; también se compiló el paquete wheel de Python correspondiente.
- Comunicación entre nodos: patrón publicación-suscripción de eCAL, empleando UDP/TCP.

Las decisiones de compilación desde código fuente se justifican para asegurar compatibilidad óptima con las arquitecturas ARM de cada modelo de Raspberry Pi, ajustando parámetros de compilación (optimización, flags, soporte de transporte). eCAL 5.13 fue elegido por su compatibilidad con versiones anteriores, su soporte a distintos transportes y capacidades de monitor y registro (recording) de mensajes integrados Reimold et al. (2025)

2.2 Procedimiento

Una vez que cada Raspberry Pi estuvo debidamente configurada con su sistema operativo y se compiló e instaló eCAL versión 5.13 para las arquitecturas ARM correspondientes, se procedió al establecimiento de la estructura de directorios y archivos del proyecto. Esta organización inicial contempló módulos comunes y específicos para cada nodo (adquisición, procesamiento, HMI), con carpetas definidas para “core”, “img-processing”, “interfaces”, “protos”, “ci-cd scripts” y “utils”. Dentro de la carpeta proto se diseñaron los esquemas de mensajes en Protocol Buffers, con campos comunes (por ejemplo, timestamps, identificadores de sensor, metadatos de cámara) que facilitan la reutilización de mensajes en futuras extensiones hacia otros sensores o tipos de datos.

Paralelamente, se habilitó un repositorio en GitHub donde se configuraron las acciones de integración continua (GitHub Actions), de manera que el entorno se pueda levantar automáticamente, compilar los componentes eCAL y Python, y ejecutar pruebas unitarias tanto en sistemas Windows x86 como en Ubuntu x86 y Ubuntu ARM. Estas pruebas abarcan, entre otros aspectos, la serialización y deserialización de mensajes protobuf correctamente, así como

Fig. 2. Raspberry central y las utilizadas para adquisición de datos

la codificación, compresión y reconstrucción de frames de video procesados. El objetivo del pipeline de CI/CD es verificar que cualquier cambio en el código preserve la compatibilidad entre plataformas y no rompa la cadena de procesamiento de imágenes.

Con esta base de software organizada y verificada, se desplegaron los nodos publishers en las Raspberry Pi de adquisición para capturar flujos de video a diferentes resoluciones y tasas de cuadro, encapsulando los datos en mensajes protobuf y enviándolos mediante eCAL en modo publicación. En el nodo central (Pi 5) se ejecutaron módulos subscribers que reciben estos mensajes, deserializan los datos, reconstruyen los frames y calculan métricas de latencia, pérdida y sincronización. En paralelo, el nodo HMI (Pi 3) ejecuta una interfaz gráfica que permite activar o desactivar los streams, monitorear el estado del sistema y emitir comandos simples hacia el nodo central.

Durante las pruebas se variaron parámetros como el número de cámaras activas (de una hasta cuatro), la resolución de video (p. ej. 640×480, 1280×720) y la tasa de cuadros (por ejemplo 15 fps, 30 fps). Además, se ajustaron buffers internos y políticas de calidad de servicio de eCAL para evaluar su comportamiento bajo carga. En cada ejecución se registraron métricas en los nodos: uso de CPU, memoria, volumen de datos transmitidos, porcentaje de mensajes perdidos y latencias observadas. Finalmente, con esos datos se llevará a cabo un análisis estadístico para identificar cuellos de botella, comparaciones entre escenarios y límites operativos del sistema.

3. RESULTADOS

Durante la fase de pruebas del sistema se obtuvo evidencia visual y registros de operación que confirman el correcto funcionamiento de la plataforma distribuida. En la figura 2 se muestran las Raspberry Pi utilizadas interconectadas en la red en su configuración física, permitiendo constatar la arquitectura desplegada tal como fue diseñada.

En la figura 3 se presenta una captura de pantalla de uno de los logs del sistema, en la que se reportan valores relativos al sistema: frames por segundo (FPS), latencia de transmisión, mensajes perdidos, niveles de compresión aplicados y tipo de compresión aplicada.

En la figura 4 se evidencia el sistema funcionando con las 4 cámaras activas simultáneamente, mostrando en tiempo real los indicadores clave: FPS recibidos en cada nodo,

```
Publisher started for webcam_stream_0 | Encoding=JPEG | Quality=80
Cam0 | Frame 0029 | FPS: 15.0 | Size: 15901 bytes | Latency: 7.3ms
Cam0 | Frame 0089 | FPS: 29.8 | Size: 15906 bytes | Latency: 6.4ms
Cam0 | Frame 0149 | FPS: 29.8 | Size: 15915 bytes | Latency: 8.5ms
Cam0 | Frame 0209 | FPS: 29.8 | Size: 15892 bytes | Latency: 8.4ms
Detailed Stats - Frames: 269 | Time: 10.0s | MB sent: 4.08 | Avg Latency: 7.3ms
Cam0 | Frame 0269 | FPS: 29.8 | Size: 15899 bytes | Latency: 8.9ms
Cam0 | Frame 0329 | FPS: 29.8 | Size: 15895 bytes | Latency: 7.4ms
Cam0 | Frame 0389 | FPS: 29.8 | Size: 15890 bytes | Latency: 7.7ms
Cam0 | Frame 0449 | FPS: 29.9 | Size: 15926 bytes | Latency: 6.7ms
Cam0 | Frame 0509 | FPS: 29.8 | Size: 15926 bytes | Latency: 8.1ms
Detailed Stats - Frames: 568 | Time: 10.0s | MB sent: 4.54 | Avg Latency: 7.4ms
Cam0 | Frame 0569 | FPS: 29.9 | Size: 15914 bytes | Latency: 5.7ms
Cam0 | Frame 0619 | FPS: 24.8 | Size: 15913 bytes | Latency: 8.8ms
Cam0 | Frame 0677 | FPS: 28.7 | Size: 15938 bytes | Latency: 6.0ms
Cam0 | Frame 0737 | FPS: 29.9 | Size: 15898 bytes | Latency: 5.7ms
Cam0 | Frame 0797 | FPS: 29.9 | Size: 15926 bytes | Latency: 6.1ms
Detailed Stats - Frames: 854 | Time: 10.0s | MB sent: 4.34 | Avg Latency: 6.4ms
Cam0 | Frame 0857 | FPS: 29.8 | Size: 15945 bytes | Latency: 5.6ms
Cam0 | Frame 0917 | FPS: 29.7 | Size: 15994 bytes | Latency: 5.8ms
Cam0 | Frame 0972 | FPS: 27.4 | Size: 15954 bytes | Latency: 8.3ms
Cam0 | Frame 1029 | FPS: 28.1 | Size: 15893 bytes | Latency: 5.4ms
Cam0 | Frame 1087 | FPS: 28.6 | Size: 15965 bytes | Latency: 6.0ms
Detailed Stats - Frames: 1142 | Time: 10.0s | MB sent: 4.38 | Avg Latency: 6.4ms
Cam0 | Frame 1147 | FPS: 29.9 | Size: 15957 bytes | Latency: 4.9ms
Cam0 | Frame 1207 | FPS: 29.8 | Size: 15920 bytes | Latency: 6.7ms
```

Fig. 3. Información desplegada en consola para monitoreo en pruebas de desempeño

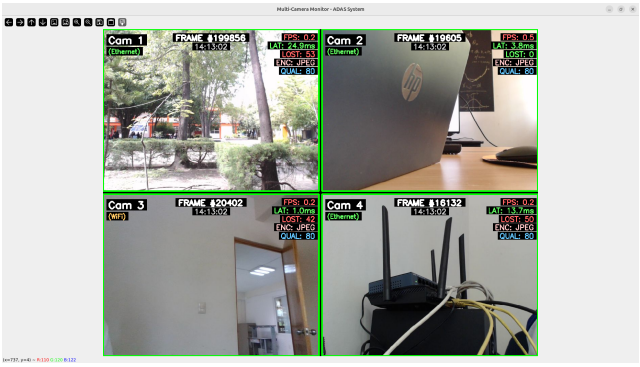


Fig. 4. Captura de pantalla del sistema procesando 4 transmisiones de video

latencia entre publicación y recepción, tasa de mensajes perdidos, eficiencia de codificación y grado de compresión alcanzado.

Respecto a las estrategias de compresión implementadas, se evaluaron dos enfoques: JPEG (con pérdidas) y LZ4 (sin pérdidas). La codificación JPEG permite una reducción significativa del tamaño de los datos transmitidos al descartar información visual considerada "menos importante", lo que potencialmente mejora la tasa de cuadros recibidos y reduce la latencia bajo carga pesada, aunque con degradación visual Pawłowski and Piniarski (2024). Por su parte, la compresión LZ4 ofrece una alternativa sin pérdidas, preservando la integridad de cada frame, pero con menos reducción de tamaño y posiblemente mayor carga de procesamiento Ortega et al. (2022).

En las capturas de log (figura 3) se observó que bajo codificación JPEG, la tasa de cuadros (FPS) tiende a ser más alta en comparación con LZ4 cuando el sistema está sometido a múltiples cámaras activas, aunque los valores de latencia muestran mayor variabilidad. Con LZ4 la tasa de mensajes perdidos fue mínima en muchos escenarios de baja carga, pero al escalar a 4 cámaras la compresión sin pérdidas mostró mayores exigencias de ancho de banda, provocando ocasionales pérdidas y aumentos en la latencia. En la figura 4, al operar con 4 cámaras simultáneas, la interfaz del sistema indica que los FPS promedio se mantienen en un intervalo operativo aceptable, aunque se evidencian pérdidas esporádicas de mensajes y latencias

que varían en función de la resolución usada, la estrategia de compresión y el modo de conexión a la red.

Estos resultados preliminares validan que el sistema es funcional bajo escenarios con múltiples cámaras y muestran un comportamiento diferenciado según la técnica de compresión aplicada. También permiten identificar condiciones límite en las que la arquitectura distribuida, el middleware eCAL y el hardware Raspberry Pi comienzan a mostrar limitaciones en términos de rendimiento, lo cual sirve de base para el análisis estadístico y siguientes etapas de implementación, en particular módulos para la detección de objetos de interés, segmentación semántica y/o reconstrucción del entorno.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta plataforma distribuida para prototipado de sistemas ADAS demuestra que es factible integrar hardware accesible como Raspberry Pi modelos 3, 4 y 5 con middleware eCAL y Google Protocol Buffers para manejar múltiples cámaras, adquisición de datos, transmisión y visualización en un nodo central y una interfaz HMI. La implementación actual confirma que el sistema reporta métricas clave como FPS, latencia, mensajes perdidos, codificación y nivel de compresión de manera consistente, tanto usando JPEG (compresión con pérdidas) como LZ4 (sin pérdidas). Aunque aún no se cuenta con análisis estadístico completo, los registros iniciales indican que JPEG proporciona mayor tasa de cuadros bajo carga mayor, mientras que LZ4 favorece integridad de datos y menor pérdida, aunque con mayor requerimiento de ancho de banda y carga de procesamiento.

Como trabajo a futuro, se proyecta escalar la plataforma mediante la incorporación de módulos de segmentación semántica para detectar regiones de interés (peatones, vehículos, aceras, camino transitable), así como agregar más cámaras y nodos de procesamiento que permitan tareas de aprendizaje profundo. Se plantea usar modelos como UNet y YOLO para segmentación y detección, además de módulos para reconstrucción del escenario en 3D vía calibración de cámaras, visión monocular, y estimación de disparidad en arreglos estéreos. Estas extensiones permitirán no solo enriquecer la percepción del sistema, sino también evaluar cuellos de botella en procesamiento, comunicación y sincronización en escenarios más exigentes. La modularidad del diseño actual y el uso de CI/CD y pruebas unitarias proporcionan una base sólida para estas expansiones sin comprometer la calidad del software.

Por lo tanto, la plataforma ha alcanzado un punto donde su funcionamiento es estable bajo escenarios moderados, y sus resultados iniciales son alentadores. Las mejoras propuestas apuntan a extender sus capacidades hacia tareas más sofisticadas y demandantes de visión por computadora y reconstrucción espacial, lo que abrirá la puerta para investigaciones adicionales enfocadas en optimización de rendimiento, latencia y eficiencia energética en entornos distribuidos embebidos.

REFERENCIAS

El Hafid, Y., El Rharras, A., Chehri, A., Saadane, R., and Wahbi, M. (2020). Real-time data processing in autonomous vehicles based on distributed architecture: A case study. In X. Qu, L. Zhen, R.J. Howlett, and L.C. Jain (eds.), *Smart Transportation Systems 2020*, 143–154. Springer Singapore, Singapore.

Google (2025). Protocol Buffers. `https://developers.google.com/protocol-buffers/`.

Ortega, J.D., Cañas, P.N., Nieto, M., Otaegui, O., and Salgado, L. (2022). Challenges of large-scale multi-camera datasets for driver monitoring systems. *Sensors*, 22(7). doi:10.3390/s22072554. URL `https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2554`.

Pawłowski, P. and Piniarski, K. (2024). Efficient lossy compression of video sequences of automotive high-dynamic range image sensors for advanced driver-assistance systems and autonomous vehicles. *Electronics*, 13(18). doi:10.3390/electronics13183651. URL `https://www.mdpi.com/2079-9292/13/18/3651`.

Reimold, F., Schilasky, R., KerstinKeller, Peguen, Hannemann, K., DownerCase, Keller, K., aaroon-5, emilbic28, MihaiIMuraru, Brakmić, A., KaiKosch, Adriana, C., Kupusoglu, O., Borgert, T., dependabot[bot], Wolf, K., Romero, P., tcoyvwac, jheeks, Docker, S.N., SirArep, KaanConti, patrick-fleischmann-conti, jo-mue, Hamdi, H., bkhalifaconti, ashariff-11, Aeon, and Tran, P. (2025). eclipse-ecal/ecal. https://github.com/eclipse-ecal/ecal. URL `https://github.com/eclipse-ecal/ecal`.

Rövid, A., Vincze, Z., Pálinkás, T., Kocsis, M., Serrano, V., and Szalay, Z. (2025). Reference platform for adas camera system evaluation. *Sensors*, 25(6). doi:10.3390/s25061690. URL `https://www.mdpi.com/1424-8220/25/6/1690`.

Valenzuela, N.J.B., González, J.R.D.M., Llana, I.T.A., Rangel, H.R., and Huitrón, V.A.G. (2024). Sistema para detección de objetos mediante visión artificial implementado en arquitectura arm para aplicaciones de navegación autónoma. *Revista ELECTRO*, 46, 369–373. URL `https://itchihuahua.mx/revista`$_e$*lectro*/2024/$A41_3$69–373.*pdf*.

Yigui, L., Youteng, S., Schade, F., Hotfilter, T., Becker, J., Yuan, Z., Zizhou, O., and Weiming, L. (2019). Evaluation of a high-throughput communication link for future automotive adas controllers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(9), 2371–2378. doi:10.1177/0954407019851334. URL `https://doi.org/10.1177/0954407019851334`.

Analysis of SSH Service Logs for the Detection and Prevention of Cyberattacks and Unauthorized Access

González Hernández, Jorge Luis*, Valtiérrez Angel, David Arnoldo *, Vázquez Tiscareño, Raúl *, Acosta Armendáriz, Cesar Adán *, Nevárez Fierro, Cesar Jesús *, Fierro Villarreal, Victorina**

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Delicias, Paseo Tecnológico Km 3.5 Cd. Delicias, Chihuahua, México. C.P. 33000. (Tel: (667) 888-5000; e-mail: jorge.gh@delicias.tecnm.mx; david.va@delicias.tecnm.mx; raul.vt@delicias.tecnm.mx; cesar.aa@delicias.tecnm.mx; cesar.nf@delicias.tecnm.mx)*

*** Centro de Estudios Tecnológicos Ind. y de Serv. #87. Av. Tecnológico s/n, Centro. Cd. Delicias, Chihuahua, México. C.P. 33100. (Tel: (639) 474 4958; e-mail: vickyfierro04@gmail.com)*

Abstract: In the contemporary digital environment, information has become one of the most strategic assets for public and private organizations worldwide. However, its storage on web servers and the automation and navigation of information on the Internet have brought with them constant exposure to cyber threats, where malicious actors such as hackers seek to breach computer systems to gain unauthorized access to sensitive data. Educational institutions, such as the Instituto Tecnológico de Delicias, are not exempt from these risks, facing daily challenges like those of any educational or corporate institution regarding the protection of digital infrastructure. Cybersecurity, therefore, has become an essential component of technological governance, encompassing everything from network protection to the prevention of physical intrusions using unauthorized devices. Given the detection of suspicious access to institutional servers, the primary objective is to implement robust solutions that monitor, block, and prevent new threats. In response to these cyberattacks, the development of a specialized tool called "TecNetTraking" was initiated. Its purpose is to strengthen server monitoring, optimize network security and performance, and ensure the integrity of all institutional users' information. This strategy aligns with international cybersecurity best practices, promoting a resilient, efficient digital environment that is prepared to face the challenges of an interconnected society. This research aligns with the research line LGAC-2022-DELI-ISCO-625: “Computer Systems and Information Technologies”. It uses a quantitative approach for a universal population of 1820 users with a simple random sample of 317 surveyed users, with a confidence level of 95% and a sampling error of 5%.

Keywords: Institutional servers, Information, Hacker, Cyberattacks, Cybersecurity.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los mayores activos dentro de una empresa u organización, es la información, no obstante, este valor implícito también la convierte en un atractivo para la ciberdelincuencia, cuyos miembros activos, los piratas informáticos denominados Hackers, buscan y aplican diferentes técnicas y estrategias para vulnerar las defensas de los servidores (servidor de archivos, servidor, web, etc.), que pretenden hackear, y en este particular caso, el Instituto Tecnológico de Delicias (en lo sucesivo ITD), no es la excepción.

En el sentido estricto de la palabra “la seguridad informática trata sobre la protección de información de índole personal, empresarial o gubernamental contenida no solo en la red, sino también en diferentes dispositivos contra amenazas que puedan poner en riesgo la información” (Gamboa, 2019), considerando que, periódicamente existen “diferentes ataques por DNS basados principalmente en el robo de identidad. Los keyloggers también pueden ser utilizados para la seguridad informática, ya que permiten hacer un seguimiento de lo que hacen los usuarios cuando utilizan el equipo” (Avenía Delgado, 2017).

Por ello, se trabaja arduamente en el desarrollo de nuevas estrategias de defensa que inhiban el porcentaje de ataques cibernéticos que se llevan a cabo diariamente por terceros.

En donde la seguridad es un tema que reviste vital importancia, ya que, según Bernal Ontiveros, Palacios Reyes, Zorrilla Briones, Rosales Morales y Cervantes Cárdenas (2025), definen que, “las brechas de seguridad en instituciones educativas son frecuentes por factores, como falta de capacitación del personal encargado de sistemas informáticos, dependencia creciente de plataformas digitales, limitada disponibilidad de recursos tecnológicos y financieros, así como la gestión de información”, por tal motivo, los administradores encargados del sistema de redes en el ITD se ven obligados a reforzar las medidas de seguridad.

Recientemente, al realizar una inspección de todo el sistema de red en los servidores del ITD, se ha detectado un usuario "extraño" no identificado y es importante, no solo bloquearlo, sino impedirle sistemáticamente las posibilidades de reingreso, toda vez que, "los hackers crean y utilizan software maligno para obtener acceso no autorizado a sistemas informáticos y datos confidenciales, secuestrar y operarlos de forma remota, dañarlos o retener datos como rehenes por grandes sumas de dinero" (IBM, 2024).

Por consecuencia se impone optimizar las medidas de seguridad en la infraestructura de la red puesto que "los problemas de seguridad de las redes pueden dividirse en cuatro áreas interrelacionadas: Confidencialidad, autenticación, no repudio y control de integridad", mediante el desarrollo y codificación de un nuevo software web denominado "**TecNetTraking**", para reforzar las medidas de defensa informáticas con las cuales actualmente cuentan los servidores del ITD, llevando a cabo un monitoreo de servidores más eficiente pues, "con el monitoreo de la red, un equipo de TI puede averiguar qué problemas tienen más probabilidades de surgir y cómo prevenirlos reemplazando o reparando componentes con fallas" (Fortinet, 2025).
Derivado de lo anteriormente expuesto, el objetivo es proporcionar una herramienta que proteja uno de los activos más importantes de esta institución: La Información.

Ante los posibles ciberataques tal y como se muestra en la figura 1, se describe como a través de ataques de fuerza bruta, el atacante va descifrando contraseñas hasta que logra su objetivo al encontrar una clave de acceso valida e inmediatamente puede hacer uso de ella para efectuar ataques.

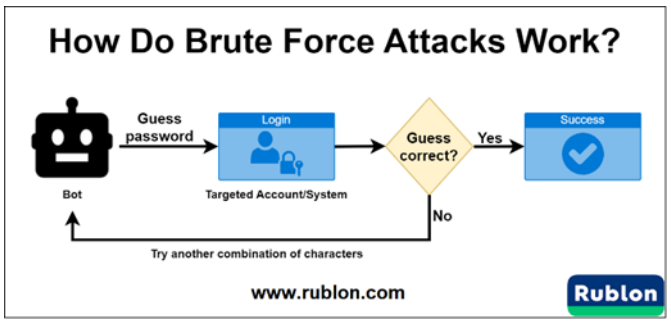


Fig. 1. Como funciona un ataque de fuerza bruta.
Fuente: Rublon.com (2023).

1.1 Planteamiento del Problema

¿Cómo utilizar los registros log de un servicio SSH que permita identificar los intentos de acceso de usuarios no autorizados, reconociendo las actividades ilícitas más comunes que realiza, para que no pueda ingresar al sistema operativo de los servidores del Instituto Tecnológico de Delicias?

1.2 Objetivo General

Desarrollar e Implementar un prototipo de software nuevo llamado TecNetTraking para controlar el acceso de usuarios no autorizados y bloquearlos automáticamente en el núcleo de los servidores SSH del Instituto Tecnológico de Delicias, logrando una reducción del 80% en los intentos de acceso no autorizados a corto plazo.

1.3 Hipótesis

La implementación un nuevo software prototipo llamado TecNetTraking para el monitoreo del tráfico y verificación de usuarios conectados, reduce los ataques cibernéticos en los servidores SSH del Instituto Tecnológico de Delicias.

2. ANTECEDENTES.

Como referente, actualmente miles de hackers alrededor del mundo están lanzando constantemente millones de ataques de forma simultánea, sobre diversos servidores de archivos colocados geográficamente en distintos puntos del planeta y habilitados para el procesamiento de los datos y la información, e indudablemente su principal objetivo es encontrar puntos vulnerables que les permitan lograr penetrar estos sistemas. Ahora bien, derivado de lo anteriormente expuesto, se presenta la modalidad de "ataques de fuerza bruta por penetración". Pero ¿qué significa este término?

De entrada, es un tipo de hacking ético para medir la vulnerabilidad de los sistemas, y es una forma de ataque antigua pero aún muy eficiente, utilizada por los hackers, sin embargo, según McAfee (2025), "Un ataque de fuerza bruta consiste en probar todas las combinaciones posibles de caracteres hasta encontrar la correcta. Parece imposible, pero las computadoras actuales pueden probar no ya millones, sino miles de millones de combinaciones por segundo".

Por otra parte, en términos generales, un sistema de servidores de archivos, como el que caracteriza al presente en las instalaciones del ITD, solo será relativamente seguro y confiable si puede al menos ser garante de tres aspectos o áreas a controlar: Confidencialidad, integridad y disponibilidad, en donde según Bejarano Forero (2017, pág. 10), define conceptualmente cada constructo bajo los siguientes términos:

> "Confidencialidad, se busca que la información sea de uso o conocimiento exclusivo de un pequeño sector en la compañía, no es recomendable que todos los empleados tengan permisos de acceso y puedan afectar la Integridad, lo cual implicaría que los datos podrían ser manipulados, cambiados, borrados de su origen. La Disponibilidad le permite sólo al personal autorizado ingresar en cualquier momento y realizar actividades de Lectura y Escritura sobre la información".

Cabe mencionar que, "el costo de la seguridad que implementamos nunca debe superar el valor de lo que protege" (Jeong, Lee, y Lim, 2019, citados por Vega Briceño 2021). En cuanto a seguridad, actualmente, los protocolos implementados en los servidores del ITD, basan su operatividad, en la plataforma de un protocolo SSH (Secure Shell o Cubierta segura), el cual de acuerdo con De Luz (2023), es un "protocolo seguro para la administración remota de servidores, routers, switches, etcétera. Permite manejar por completo el servidor mediante un intérprete de órdenes, redirigir el tráfico de X para ejecutar programas gráficos a través de la propia sesión SSH".

Este protocolo ha sido seleccionado por los administradores del servicio de red en las instalaciones del ITD, ya que permite "configurarlo en detalle para dotar al sistema de máxima seguridad posible, proporcionando confidencialidad (datos cifrados punto a punto), autenticación (con usuario/clave, incluyendo criptografía de clave pública) e integridad (comprobar la integridad de datos mediante HMAC) de todos los usuarios" (De Luz, 2023).

"En última instancia, intentaremos protegernos contra las formas más probables de ataque, en la mejor medida que podamos, dado nuestro contexto" Vega Briceño (2021). Ciertamente, se observa y comprueba, que el protocolo SSH, es una excelente herramienta gestora en el manejo de las telecomunicaciones y de las más seguras, a pesar de no poseer una interfaz gráfica y demandar muchos recursos tanto de capacidad como de procesamiento, no obstante, lo anterior, también el presente equipo de investigación pudo comprobar que es un protocolo con cierto nivel de vulnerabilidad, ya que se pudo corroborar que puede ser "atacado" por otros protocolos de comunicaciones.

Por ende, es necesario e imperativo reforzar las medidas de seguridad ya que, según el Informe de Riesgos de Seguridad del Instituto SANS de 2007, "los ataques de fuerza bruta contra servicios remotos como SSH se encuentran entre las 20 formas más comunes de ataque en Internet comprometiendo servidores. Un número excesivo de inicios de sesión fallidos es señal de ataques contra su servidor SSH" (Carnegie Mellon University, 2025).

En la figura 2, se establece la arquitectura de un servicio SSH, en donde se validan los protocolos de conectividad, protocolos de autenticación de usuarios y los protocolos de transportación de datos basados en mecanismos de integridad y encriptación.

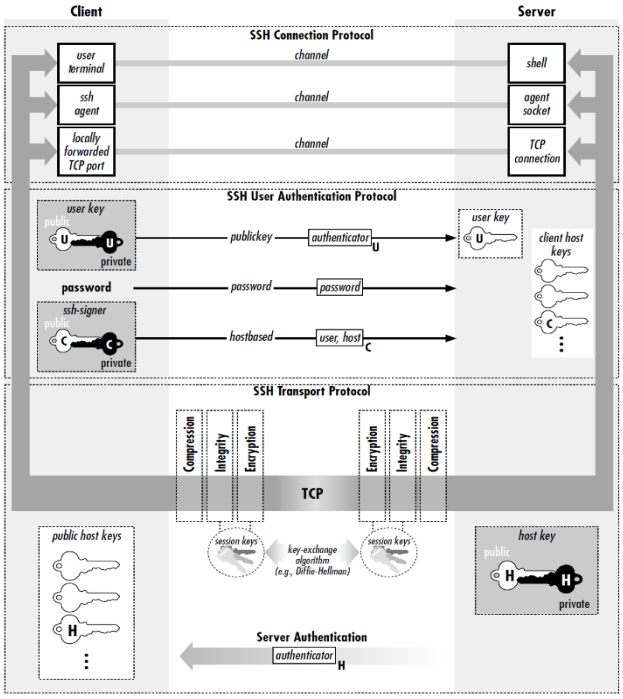


Fig. 2. Arquitectura SSH-2. Fuente: Barrett y Silverman (2001).

En la siguiente figura 3, se explica y valida el funcionamiento de un protocolo SSH, desde el inicio de sesión, la validación de la clave del usuario, así como el establecimiento de los parámetros para un canal seguro de ingreso.

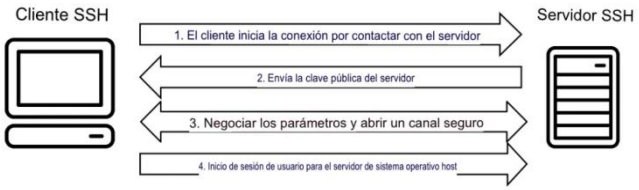


Fig. 3. Explicación del funcionamiento del protocolo SSH (vía ssh.com). Fuente: EsGeeks (2025).

3. MARCO TEÓRICO

Hoy en día, en cualquier contexto empresarial, académico, gubernamental o de cualquier índole, el manejo y control de la información juega un rol muy importante, ya que define el éxito o un eminente fracaso organizacional por una mala gestión en el manejo de esta. Por otra parte, es del conocimiento público, que la información se constituye como uno de los activos más importantes de una entidad productiva, solo después del activo humano y, considerando que un "Activo, desde el punto de vista contable, se define como cualquier cosa de valor, tangible o intangible, propiedad de una empresa" (Baca Urbina, 2016), queda claro que, "la información es fundamental para la vida de todo ser vivo, para cualquier tipo de empresa, así como también para la sociedad en general" (ibidem, 8).

Por lo tanto, es de carácter prioritario pues, que los mecanismos de protección deben siempre estar, no solo a la vanguardia, sino incluso, un paso adelante de la ciberdelincuencia que opera a distintos niveles; desde local, nacional y por supuesto en el contexto internacional.

De ahí la importancia de establecer amplios mecanismos eficientes y eficaces de protección en seguridad informática. Según la ISO/IEC (2016) citada por Vega Briceño (2021), "la seguridad de la información se podría definir como aquellos procesos, buenas prácticas y metodologías que busquen proteger la información y los sistemas de información del acceso, uso, divulgación, interrupción, modificación o destrucción no autorizada".

Y por otro lado resalta su importancia conceptual y pragmática cuando según Baca Urbina (2016), afirma que:

> "La seguridad informática es la disciplina que [sic] con base en políticas y normas internas y externas de la empresa, se encarga de proteger la integridad y privacidad de la información que se encuentra almacenada en un sistema informático, contra cualquier tipo de amenazas, minimizando los riesgos tanto físicos como lógicos, a los que está expuesta".

No obstante, lo anteriormente enunciado, en el ámbito de la seguridad informática, existe una frase muy famosa de Eugene Spafford, citado por Avenía Delgado (2017), el cual afirma que:

> "El único sistema totalmente seguro es aquel que está apagado, desconectado de la red, guardado en una caja fuerte de titanio, encerrado en bunker de concreto, rodeado por gas venenoso y cuidado por guardias bien armados y muy bien pagados. Aun así, no apostaría mi vida por él".

Los servidores de archivos siempre estarán expuestos a múltiples ataques, máxime si contienen información confidencial o valiosa como, por ejemplo, los servicios de la banca electrónica, e indudablemente los servidores de instituciones académicas no son la excepción pues "la seguridad de la información es un concepto que se involucra cada vez más en muchos aspectos de nuestra sociedad hiperconectada, en gran parte como resultado de nuestra adopción casi ubicua de la tecnología de información y comunicación" (Vega Briceño, 2021).

Dentro de las herramientas más comunes utilizadas por los hackers destacan: Metasploit, un software de código abierto utilizado para probar la seguridad de sistemas informáticos y sus posibles vulnerabilidades que realiza pruebas de penetración, tanto para fines legítimos de prueba como para fines no autorizados.
Otra herramienta de uso común es OWASP Zed, de código abierto que realiza pruebas de seguridad en aplicaciones web, funcionando como un proxy de ataque entre un navegador y una aplicación web para encontrar y explotar vulnerabilidades.
Finalmente, está la aplicación denominada Hydra, una potente herramienta de software utilizada para realizar ataques de fuerza bruta y de diccionario con el objetivo de descifrar contraseñas de servicios de red.

Por ello es importante llevar a cabo la protección de los usuarios, priorizando que, "también debemos proteger a las personas que participan en las operaciones de la organización o empresa. Las personas son nuestro activo más valioso" (Vega Briceño, 2021).
Ante esta eventualidad se considera de carácter obligatorio la necesidad proteger los activos de la institución en los servidores del ITD al considerar que, de acuerdo con Vega Briceño (2021), se pueden "tener elementos de naturaleza más etérea, como software, código fuente o datos. En el entorno informático actual, es probable que descubramos que nuestros activos lógicos son al menos tan valiosos, si no más, que nuestros activos físicos".

Adicionalmente, como medidas de protección, hoy día existen propuestas como Snort, "un sistema de detección de intrusiones (IDS) y prevención de intrusiones (IPS) de código abierto, para analizar el tráfico de red en busca de patrones de comportamiento malicioso o sospechoso" (Pérez Mosquera, 2023), sin embargo, TecNetTraking esta desarrollado justamente a las necesidades de trafico y monitoreo de los servidores del ITD.

Por lo tanto, como se esquematiza en la figura 4, es importante establecer políticas de prevención o corrección por capas de una red ante un eventual ciberataque, aplicando muros de fuego, autenticación o sistemas de detección como la propuesta del nuevo prototipo TecNetTraking.

Figura 2: Defensas en cada Capa.

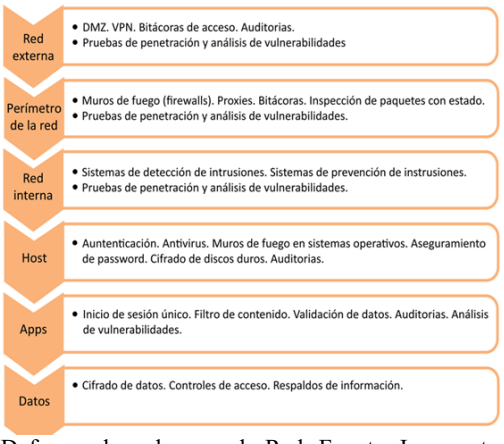


Fig. 4. Defensas de cada capa de Red. Fuente: Imagen tomada del Libro: Seguridad de la información. Autor: Vega Briceño (2021).

4. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de Estudio

En el presente estudio de investigación se implementa un enfoque Cuantitativo, con una muestra aleatoria simple, que permita medir estadísticamente si los resultados obtenidos al implementar el Software de aplicación TecNetTraking, logra controlar el acceso no autorizado de piratas informáticos que ingresan al núcleo de los servidores SSH del ITD, mediante su ejecución y con el fin de blindar y otorgar un mejor servicio a los usuarios del ITD, monitoreando los estadísticos de conexión y tráfico en los servidores dentro de las instalaciones, ya que de acuerdo con Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2010), el enfoque cuantitativo, "usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base a la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías". Esperando aportar evidencia a favor de la hipótesis previamente aquí planteada.

4.2 Determinación del universo y obtención de la muestra

Para recabar información pertinente al presente estudio, se tomó en cuenta una población universal de **1,820 estudiantes**, incluyendo a otros usuarios como los principales actores de la educación, entre los que destacan: Directivos, jefes de departamento, Administrativos y personal docente.

Además, se utilizó un Cuestionario autoadministrado al ser aplicado, ya que, de acuerdo con Hernández Sampieri, et al (2010, p. 235), "se proporciona directamente a los participantes" o respondientes, en este caso los alumnos del Instituto Tecnológico de Delicias y personal en general, quienes lo contestaron marcando las respuestas que ellos consideraron más pertinentes, evitando así, el sesgo de intermediarios. Con ello, se agilizó la toma de decisiones sobre la pertinencia de desarrollar un software de aplicación web denominado TecNetTraking para el monitoreo de tráfico de la red y usuarios conectados, que permita optimizar el blindaje ante el ingreso no autorizado por parte de usuarios ajenos al Sistema de red en las instalaciones del ITD.

4.3 Plan de recolección de la información para el trabajo de campo.

Como se mencionó en apartados anteriores, se utilizó un Cuestionario Autoadministrado, complementándolo con la técnica de la Observación Cuantitativa, para analizar los efectos y el impacto del sistema TecNetTraking, descargando los datos estadísticos obtenidos en una bitácora de registro mensual, durante un periodo de 6 meses a dos años, evaluando al final la pertinencia y eficiencia del software de Aplicación puesto a prueba en esta investigación.

4.4 Plan de procesamiento y análisis de información

El procesamiento de datos se llevará a cabo mediante un ejercicio estadístico con el fin de "obtener distribuciones de frecuencia y efectuar diversos cálculos estadísticos…", (Arias Galicia, 2007, p. 204), de tal forma que se puedan sustentar los resultados obtenidos en esta investigación. En este análisis estadístico se utilizó PASW 18. De tal manera que, para hacer una extrapolación de la muestra Universal, y determinar a "n" muestral, se utilizará la siguiente formula estadística:

$$\mathbf{n} = \frac{K^2 * p * q * N}{(e^2 * (N-1)) + K^2 * p * q} \qquad (1)$$

Donde:
N: Representa la población universal.
n= Tamaño de la muestra a evaluar.
K= Nivel de Confianza. (Para el caso de la presente investigación se utiliza un valor constante de 1.96, derivado de un 95% de confianza).
p y **q**= Representan la proporción de individuos que poseen o no una característica en este estudio y se corresponden con un 50% (0.5), cada uno.
e: Corresponde a el error muestral deseado. (En este estudio se utiliza el 5%).
Sustituyendo:

$$\mathbf{n} = (1.96)2 * (0.5*0.5)*1820$$
$$((0.05)2 * (1820-1)) + ((1.96)2 * (0.5*0.5)$$

$$\mathbf{n} = \frac{1747.928}{5.5079} = \mathbf{317.35}$$

El propósito central de esta investigación, es determinar factores o datos estadísticos, como la varianza, la media y por supuesto, la moda para medir tendencias, ya que de acuerdo con Bernal Torres (2006), "la moda es la categoría o puntuación que ocurre con mayor frecuencia en un registro de datos", utilizando los denominados estadígrafos, ya que según Hernández Sampieri, et al (2010, p. 305), "los datos casi siempre se recolectan de una muestra y sus resultados estadísticos se denominan estadígrafos; ejemplo de ello son la media o la desviación estándar de la distribución de una muestra".
Para efectos del presente estudio, se aplicó un instrumento de recolección de datos para **317 usuarios** en activo que utilizan las aplicaciones de los servidores en el ITD.

4.5 Plan de presentación gráfica de los resultados

Reiteradamente, el procesamiento de datos se llevó a cabo haciendo uso del Software estadístico PASW 18. Aplicando análisis de estadísticos descriptivos porcentuales.

Los resultados obtenidos en cuanto, al cuestionario aplicado se refiere, serán graficados utilizando esquemas o gráficos circulares tridimensionales, que ejemplifiquen mejor dichos resultados preliminares, ya que según Bernal Torres (2006), "las distribuciones de frecuencia se presentan muy a menudo en forma de figuras gráficas denominadas histogramas (gráficas de Barras) o en gráficas circulares", empleadas preferentemente para mostrar datos estadísticos numéricos obtenidos en este estudio de investigación.

En la figura 5, se muestra la configuración de los diferentes parámetros del software estadístico PASW 18, en donde se declararon las variables de estudio, las etiquetas y la operacionalización de variables, entre otros.

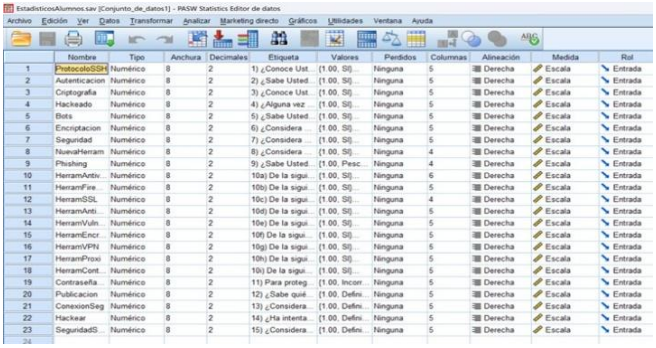


Fig. 5. Pantallas del análisis estadístico y graficación en PassW18.
Fuente: Elaboración propia. (2025).

Respecto a los resultados obtenidos al implementar el Software para monitoreo ***TecNetTraking***, se pretende que estos sean presentados en el presente ciclo escolar de agosto-diciembre del 2025, tal y como se muestra en la **figura 6**.

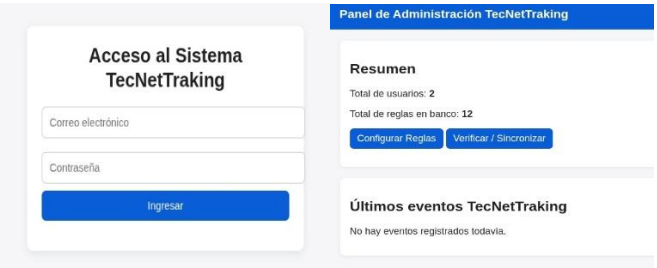


Fig. 6. Acceso y resumen de la App Web **TecNetTraking**.
Fuente: Elaboración propia. (2025).

En la figura 7, se muestra como se lleva a cabo un monitoreo constante de los servidores del ITD, mediante la aplicación de la herramienta TecNetTraking, en donde se demuestra el ataque constante por parte de usuarios no autorizados, conocidos comúnmente como hackers.

Fig. 7. Pantallas de la App Web **TecNetTraking** y la seguridad ante ataques recurrentes de usuarios no autorizados.
Fuente: Elaboración propia. (2025).

5. RESULTADOS

La implementación del sistema de monitoreo de redes y la simpleza de sus componentes hardware en combinación con la robustez de su software, hace que el sistema TecNetTraking, sea una alternativa viable más para la seguridad de las telecomunicaciones y la transmisión de datos, aportando evidencia a favor de la **hipótesis** aquí propuesta.
Actualmente se ha logrado el **objetivo** general de esta investigación al implementar y controlar el acceso de usuarios no autorizados para bloquearlos automáticamente en el núcleo de los servidores SSH del Instituto Tecnológico de Delicias, reduciendo los intentos de acceso no autorizados.

Si bien el porcentaje planteado se está trabajando aún para alcanzarlo, el prototipo funcional del software denominado TecNetTraking, ya está en funcionamiento actuando como un blindaje para Infraestructura SSH del ITD, en virtud de que es un software de aplicación especializado en la protección activa de los servidores SSH del Instituto Tecnológico de Delicias (ITD). Siendo actualmente su principal función detectar, bloquear y monitorear accesos no autorizados, especialmente aquellos intentos de intrusión por parte de piratas informáticos que buscan vulnerar el núcleo operativo de los servidores.

A través de una ejecución continua, TecNetTraking fortalece la seguridad digital institucional, garantizando un servicio más confiable para los usuarios ya que incorpora módulos de análisis estadístico de tráfico y conexión, permitiendo una visualización en tiempo real del comportamiento de red, así como la generación de alertas ante patrones sospechosos o intentos de acceso no autorizado.
Con esta aplicación no solo se protege la infraestructura tecnológica de las telecomunicaciones, sino que también se optimiza la gestión de recursos tecnológicos, contribuyendo a una cultura de ciberseguridad proactiva dentro del entorno académico.

En cuanto a los resultados obtenidos en el cuestionario que se aplicó, como se muestra en la **figura 8**, destaca que un 87% de los encuestados no conoce el protocolo SSH y las bondades tecnológicas que éste aporta, mientras que un 16% piensa que su información no está segura en los servidores del ITD, por ello la necesidad de desarrollar e implementar un nuevo prototipo de software que permita reducir significativamente los accesos no autorizados.

Sin embargo, a pesar del dato anterior, entre un 10% y un 34%, consideran que un cifrado del protocolo SSH, es suficiente para la transferencia de archivos y datos y finalmente en el rango de un 26% y un 40%, cree que se puede comprometer la seguridad de la red en los servidores del ITD, y es por ello, que un **91%**, es decir **289 usuarios** de un total de **317 encuestados**, considera importante contar con una nueva herramienta de protección en la seguridad de los servidores del ITD, como la aquí propuesta: ***TecNetTraking***. A continuación, un extracto de los gráficos más representativos de este estudio.

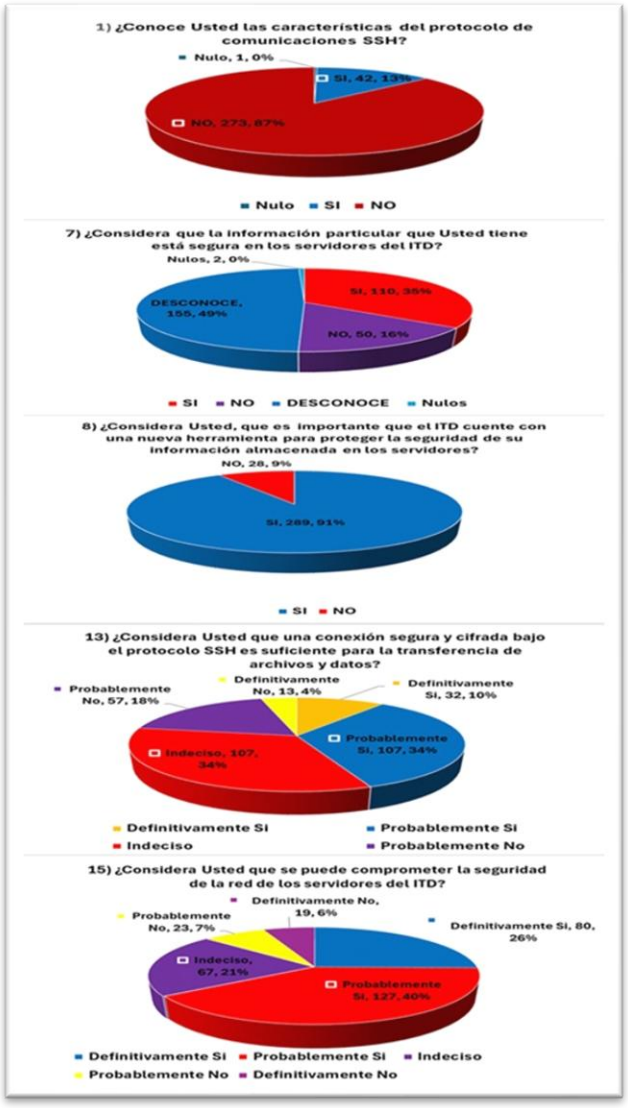


Fig. 8. Resultados de la encuesta sobre seguridad informática.
Fuente: Elaboración propia. (2025).

6. CONCLUSIONES

En este estudio de investigación, se detectaron grandes áreas de oportunidad para el desarrollo de un software con las características de funcionalidad aquí propuestas en el proyecto denominado TecNetTraking, un prototipo funcional, pero aún en vías de desarrollo. Se estarán llevando a cabo pruebas y/o depuración del código conforme se vaya desarrollando la ingeniería de software, al mismo tiempo se estarán haciendo también pruebas y análisis del monitoreo constante, el software residente en memoria y un software "señuelo" para

atraer la atención de posibles ataques al mismo, salvaguardando la integridad lo más posible de los servidores del ITD.
Con la implementación del software TecNetTraking para monitoreo del servicio de redes en los servidores del ITD, se espera consolidar una herramienta computacional informática, capaz de inhibir e incluso reducir significativamente a los usuarios ajenos no acreditados legalmente para acceder al servicio de redes en el ITD.

Una situación crítica y recurrente que impone la necesidad de reforzar y blindar más ampliamente el espectro de seguridad que enmarca los servidores del ITD y su integridad, si se considera que, "el primer semestre de 2023 estuvo marcado por un panorama de ciberseguridad de amenazas y desafíos evolucionando a un ritmo sin precedentes. Los atacantes cibernéticos continúan perfeccionando sus métodos, adoptando técnicas más sofisticadas para explotar *vulnerabilidades* en diversos sectores" (DataStream, 2023).

Por ende, se concluye que el software para el rastreo, control y monitoreo de usuarios denominado TecNetTraking puede consolidarse como una alternativa viable más, basada en la innovación y excelente servicio de calidad a los usuarios, partiendo de la premisa y con una máxima prioridad de que "las organizaciones enfrentan una necesidad inigualable de fortalecer sus medidas de ciberseguridad" (DataStream, 2023).

Finalmente, cabe destacar que esta investigación tiene desde agosto del 2023 y hasta la actual fecha 2025, en donde el monitoreo de la herramienta **TecNetTraking**, ha venido aportando resultados satisfactorios, con el compromiso como siguiente fase de este estudio, implementar Métricas para mejorar la Experiencia delos usuarios del sistema de Red de los servidores del Instituto Tecnológico de Delicias para el prototipo funcional aquí propuesto, midiendo su **Tasa de Retención**, con el propósito de saber cuántos usuarios del 91% consultados pueden regresar después de que prueban la herramienta **TecNetTraking**.

REFERENCIAS

1) Arias Galicia, L. (2007). Metodología de la Investigación. 7ª. Edición. México: Editorial Trillas.
2) Avenía Delgado, C. A. (2017). Fundamentos de seguridad informática. Consultado en: https://core.ac.uk/download/pdf/326424171.pdf
3) Baca Urbina, G. (2016). Introducción a la Seguridad Informática. Consultado en: https://www.academia.edu/40572652/Introduccion_a_la_seguridad_informatica_LIBRO
4) Bejarano Forero, E. (2017). Seguridad en redes. Consultado en: https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/1419/Seguridad%20en%20redes.pdf?sequence=1&isAllowed=y
5) Bernal Ontiveros, J. M., Palacios Reyes, M., Zorrilla Briones, F., Rosales Morales, N. R. y Cervantes Cárdenas, S. A. (2025). Ciberseguridad: Métodos de Defensa Ante Ataques de Infiltraciones. Consultado en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.scielo.org.mx/pdf/ride/v16n31/2007-7467-ride-16-31-e926.pdf
6) Bernal Torres, C. (2006). Metodología de la Investigación. 2ª. Edición. México: Editorial Pearson / Prentice Hall.
7) Carnegie Mellon University (2025). Protección contra ataques SSH de fuerza bruta o diccionario. Consultado en: https://www.cmu.edu/iso/aware/be-aware/brute-force_ssh_attack.html
7) Datastream (2023). Tendencias sobre Ciberseguridad 2023. Consultado en: https://es.linkedin.com/pulse/tendencias-sobre-ciberseguridad-2023-datastreammx?trk=organization_guest_main-feed-card_feed-article-content
8) De Luz, S. (2023, 28 de junio). Servidor OpenSSH en Linux: Configuración para máxima seguridad. Consultado en: https://www.redeszone.net/tutoriales/servidores/servidor-openssh-linux-configuracion-maxima-seguridad/
9) Fortinet (2025). ¿Qué es el monitoreo de red? Consultado en: https://www.fortinet.com/lat/resources/cyberglossary/network-monitoring
10) Gamboa, J. L. (2019). IMPORTANCIA DE LA SEGURIDAD INFORMÁTICA Y CIBERSEGURIDAD EN EL MUNDO ACTUAL. Consultado en: http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/8668/IMPORTANCIA%20DE%20LA%20SEGURIDAD%20INFORM%C3%81TICA%20Y%20CIBERSEGURIDAD%20EN%20EL%20MUNDO%20ACTUAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
11) Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la Investigación. 5ª. Edición. Chile: Editorial Mc Graw Hill.
12) IBM (2024). ¿Qué es la ciberseguridad? Consultado en: https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/cybersecurity
13) McAfee (2025). ¿Qué es un ataque de fuerza bruta? Consultado en: https://www.mcafee.com/learn/es-mx/que-es-un-ataque-de-fuerza-bruta/
14) Pérez Mosquera, A. (2023). ¿Qué es Snort en ciberseguridad? Consultado en: https://www.deustoformacion.com/blog/ciberseguridad/que-es-snort
15) Vega Briceño, E. (2021). SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN. Consultado en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://3ciencias.com/wp-content/uploads/2021/03/LIBRO-SEGURIDAD-INFORMACIO%CC%81N.pdf

Artificial Intelligence for Food Security and Agricultural Sustainability. Review

Tobón-Villalva, Alfredo Nabor *, González-Lorence, Armida *, Espinosa-Calderón, Alejandro Morales-Morales, Cornelio *, Mondragón-Solís, Ana Luisa*****

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico #2 esq. Eje Central, San Juan del Río, Querétaro, 76800.*
(e-mail: {alfredo.tv, armida.gl, cornelio.mm}@sjuanrio.tecnm.mx).

*** Tecnológico Nacional de México/Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo (CRODE) de Celaya, Calle Diego Arenas Guzmán No. 901, Col. Zona de Oro, Celaya, Guanajuato. CP. 38020.*
(e-mail: alejandro.espinosa@crodecelaya.edu.mx)

**** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya, Antonio García Cubas Pte #600 esq. Av. Tecnológico. Celaya, Guanajuato. C.P. 38010.*
(e-mail: ana.mondragon@itcelaya.edu.mx).

Abstract: Ensuring global food sufficiency and agricultural sustainability is a paramount challenge for societal stability and economic development, particularly with the world population projected to reach 9.2 billion by 2050. Plant diseases alone account for losses of 20% to 40%, directly threatening food security and causing significant economic setbacks for farmers. This review examines the transformative role of Artificial Intelligence in confronting these challenges and revolutionizing the agricultural sector. The primary objective is to analyze how deep learning and machine learning, contribute to enhancing crop productivity, minimizing losses, and promoting resource-efficient practices. The methodology involves a systematic review of state-of-the-art applications, focusing on advanced architectures such as Convolutional Neural Networks, Vision Transformers, and efficient models like MobileNet and YOLO. Applications extend to yield prediction, automated field operations, and the acceleration of genetic improvement through high-throughput plant phenotyping, including root system architecture analysis. The review details the critical trade-off between high-accuracy architectures (e.g., ResNet, DenseNet) for maximum performance and lightweight models designed for efficient deployment on mobile devices and UAVs. Despite significant advancements, immediate challenges persist, including the scarcity of balanced and real-world datasets, model generalizability across diverse geographical regions, computational constraints for in-field implementation, and socio-economic barriers to farmer adoption.

Keywords: Artificial Intelligence, Food Security, Agricultural Sustainability, Plant Disease Detection, Precision Agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial es una tecnología disruptiva con el potencial de revolucionar el sector agrícola. Las técnicas de aprendizaje profundo y automático están permitiendo avances en la protección de cultivos y optimización de recursos. Estas tecnologías facilitan el diagnóstico automático, preciso y en tiempo real de enfermedades en cultivos estratégicos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales de detección. Asimismo, la inteligencia artificial es el núcleo de la agricultura de precisión, permitiendo un uso más eficiente del agua, fertilizantes y agroquímicos.

1.1 Importancia de garantizar la suficiencia alimentaria.

Garantizar la suficiencia alimentaria es fundamental para la estabilidad y el desarrollo, a nivel global. Las plantas son la base de toda forma de vida en la tierra, proveen oxígeno y son la principal fuente alimentaria para la humanidad (Lv and Zhang, 2023). Para numerosos países, hay cultivos que se consideran básicos, tales como el maíz, el arroz y la papa (Omaye et al., 2024). Se estima que para el año 2050 la población mundial alcanzará los 9 200 millones de personas, se necesita incrementar la producción de alimentos para satisfacer la demanda (Bouni et al., 2023). La detección y el manejo temprano de enfermedades en los cultivos son cruciales para mitigar las pérdidas de rendimiento, que pueden oscilar entre el 20% y el 40% de la producción mundial de alimentos (Ahmad et al., 2023).

1.2 Problemáticas que se mitigan al garantizar la suficiencia alimentaria.

• Amenazas a la seguridad alimentaria mundial: Las enfermedades de las plantas son una amenaza directa para la seguridad alimentaria global (Gülmez, 2024). Las pérdidas en cultivos básicos como el maíz, el arroz y el trigo, que son fundamentales para la dieta de miles de millones de personas,

pueden llevar a la escasez de alimentos y a la malnutrición, afectando aproximadamente al 13% de la población en países en desarrollo (Isinkaye et al., 2024).

• Impacto ambiental negativo: La dependencia de métodos tradicionales para el control de enfermedades a menudo implica el uso indiscriminado de pesticidas y otros productos químicos (Leite et al., 2024). Esto no solo contamina el medio ambiente, también puede dañar ecosistemas agrícolas y naturales (Székely et al., 2024). La agricultura de precisión, apoyada por tecnologías como la inteligencia artificial, permite la aplicación dirigida de agroquímicos, minimizando así el impacto ambiental (Ngugi et al., 2021).

• Uso ineficiente de recursos: La agricultura de precisión y la detección temprana de enfermedades permiten un uso más eficiente de recursos como el agua y los fertilizantes (Ghazal et al., 2024) . Esto reduce costos de producción y contribuye a prácticas agrícolas más sostenibles (Székely et al., 2024).

1.3. Riesgos de no garantizar la suficiencia alimentaria.

• Pérdidas de rendimiento y económicas: El riesgo directo es la pérdida de rendimiento en cultivos clave. Enfermedades fúngicas, bacterianas y virales reducen los rendimientos de cultivos como el tomate hasta en un 78% y el maíz entre un 20% y un 40% (Leite et al., 2024). Las pérdidas se traducen en reveses económicos para los agricultores y para la economía de los países (Misra and Mall, 2024).

• Dependencia de la importación y vulnerabilidad económica: Los países que no producen suficientes alimentos se vuelven dependientes de importaciones, los hace vulnerables a las fluctuaciones del mercado global y a las crisis de la cadena de suministro (Omaye et al., 2024).

• Degradación ambiental: La presión para aumentar la producción sin herramientas adecuadas puede llevar a prácticas agrícolas insostenibles, como el uso excesivo de productos químicos, que dañan la salud del suelo y el medio ambiente a largo plazo (Székely et al., 2024).

2. APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL SECTOR AGRÍCOLA

Las contribuciones de la inteligencia artificial (IA) se centran en aumentar el rendimiento de los cultivos, minimizar las pérdidas y promover prácticas agrícolas sostenibles y eficientes (Ghazal et al., 2024).

2.1. Detección y gestión avanzada de enfermedades y plagas.

• Diagnóstico temprano y preciso: La IA permite la detección y el diagnóstico automático, preciso, rápido y económico de enfermedades en los cultivos en etapas tempranas (Umar et al., 2024). La detección tradicional por expertos humanos es subjetiva, lenta y costosa (Mamun et al., 2024). Los modelos de DL, como las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y los Vision Transformers (ViTs), son eficaces en la identificación de enfermedades en cultivos esenciales como el maíz (Gülmez, 2024), el arroz (Preethi et al., 2024), el tomate (Sanida et al., 2023), la papa (Kaur et al., 2024) y el algodón (Rajasekar et al., 2022).

• Mitigación de pérdidas de rendimiento: Al permitir intervenciones oportunas, la IA ayuda a mitigar las pérdidas de rendimiento causadas por enfermedades y plagas, que pueden ser sustanciales (Ouamane et al., 2024), por ejemplo, las enfermedades fúngicas, bacterianas y virales (Gülmez, 2024).

• Detección en tiempo real y en campo: La IA facilita el desarrollo de sistemas de detección en tiempo real (Gülmez, 2024) que pueden ser implementados en dispositivos portátiles como teléfonos inteligentes y drones (UAVs) (Nyakuri et al., 2024). Esto proporciona información de primera mano a los agricultores para salvaguardar los cultivos (Kaur et al., 2024).

• Evaluación de la severidad: La IA, mediante CNNs, ahora puede calcular y clasificar automáticamente la severidad de las enfermedades de las plantas, lo cual es crucial para la toma de decisiones (Leite et al., 2024).

2.2. Optimización y sostenibilidad de los recursos (agricultura de precisión).

• Reducción del uso de agroquímicos: Sistemas guiados por IA permiten la aplicación dirigida de pesticidas y herbicidas (como en los aspersores inteligentes), reduciendo el uso indiscriminado de químicos, disminuyendo el impacto ambiental y mejorando las prácticas agrícolas sostenibles (Dolatabadian et al., 2025). Algunos modelos de DL han reducido el uso de químicos entre un 42% y un 43% (Kaur et al., 2024).

• Manejo eficiente del agua y nutrientes: Los sistemas de visión y la IA pueden monitorear las condiciones del suelo y las plantas para optimizar el uso de recursos como el agua y los fertilizantes (Rani et al., 2023). Por ejemplo, se han utilizado modelos de Redes Neuronales Artificiales (ANN) para estimar la concentración de clorofila en el betabel azucarero, ofreciendo una forma rentable y automatizada de monitorear el estado nutricional y reducir los insumos de nitrógeno, manteniendo el rendimiento (Misra and Mall, 2024). El uso de imágenes térmicas, junto con la IA, también ayuda a medir el estrés hídrico de las plantas y a planificar la irrigación (Ghazal et al., 2024).

• Automatización de tareas agrícolas: Los sistemas robóticos impulsados por IA y visión por computadora pueden automatizar la siembra, el control de malezas, la plantación y la cosecha con alta precisión, aumentando la eficiencia y reduciendo la necesidad de mano de obra (Elaraby et al., 2022) .

2.3. Predicción de cosechas y mejora de cultivos (Fenotipado).

• Predicción y estimación del rendimiento: Los algoritmos de IA analizan grandes conjuntos de datos (incluyendo imágenes multiespectrales y multitemporales) para pronosticar el crecimiento de los cultivos, predecir los brotes de enfermedades y estimar los tiempos óptimos de cosecha con notable precisión (Umar et al., 2024).

• Aceleración de la mejora genética: La IA se utiliza en el fenotipado de plantas (la cuantificación y el análisis de rasgos

físicos como la altura, la forma de la hoja y la trayectoria de crecimiento) (Liu et al., 2024). Esto es fundamental para acelerar el desarrollo de variedades de cultivos resistentes a enfermedades y de alto rendimiento, adaptadas a los cambios climáticos (Dolatabadian et al., 2025).

• Diseño de raíces: La IA y la visión por computadora están siendo aplicadas en la investigación de la arquitectura del sistema radicular (RSA), un rasgo clave para la "segunda revolución verde". El desarrollo de cultivos con sistemas radiculares que puedan adquirir más agua y nutrientes mejoraría directamente la seguridad alimentaria y la sostenibilidad (Weihs et al., 2024).

2.4. Avances en las herramientas de IA para el campo.

• Modelos ligeros y eficientes: Los investigadores están desarrollando arquitecturas de DL ligeras (como variantes de YOLO, MobileNet o EfficientNet) que son eficientes en términos de costo computacional y uso de memoria, lo que permite su despliegue práctico en dispositivos IoT con recursos limitados (Shafik et al., 2023).

• Aprendizaje por transferencia: Esta técnica permite adaptar modelos de DL pre-entrenados en grandes bases de datos (como ImageNet) a tareas agrícolas específicas, como la clasificación de enfermedades del tomate, mejorando la precisión y reduciendo la necesidad de grandes recursos computacionales y de conjuntos de datos extensos (Hesham Khan et al., 2024).

• IA explicable (XAI): La integración de modelos de DL con marcos como LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations) proporciona explicaciones visuales de las predicciones (Ammar et al., 2024). Esto genera confianza y transparencia en las decisiones impulsadas por IA, facilitando la adopción por parte de los agricultores (Nigar et al., 2024).

3. ARQUITECTURAS DE IA EN LA DETECCIÓN DE ENFERMEDADES DE PLANTAS.

Se manifiesta en un equilibrio entre la precisión y la eficiencia (Beikmohammadi et al., 2022).

Los investigadores seleccionan modelos de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y arquitecturas como los Vision Transformers (ViT) evaluando si la prioridad es el rendimiento o la capacidad de implementación en dispositivos con recursos limitados (dispositivos de borde, móviles o UAVs) (Nyakuri et al., 2024).

A continuación, se detalla la influencia de estas arquitecturas en ambos aspectos:

3.1. Arquitecturas que priorizan la precisión y el rendimiento.

Estas arquitecturas están diseñadas para la máxima capacidad de extracción de características, lo que generalmente resulta en una mayor precisión (accuracy o mAP), aunque a costa de una alta demanda de recursos computacionales (GPUs/TPUs) (Isinkaye et al., 2024). La tabla 1 muestra las características de estas arquitecturas.

Tabla 1. Arquitecturas que priorizan la precisión y el rendimiento (Fuente: Elaboración propia)

Arquitectura	Contribución a la precisión	Compromiso de eficiencia
DenseNet	Reutiliza características y mejora el flujo de gradientes con patrones de conectividad densa. Ha logrado precisiones muy altas, incluso superando el 99%	Requiere altos recursos computacionales debido a su densa conectividad, especialmente en redes extremadamente profundas.
ResNet (Redes residuales)	Utiliza bloques de aprendizaje residual con conexiones de salto, facilita el entrenamiento mitigando el desvanecimiento del gradiente. Eficaz para características complejas.	Tiende a ser computacionalmente costosa debido a su gran número de capas. Modelos como ResNet-50 han sido superados en eficiencia por modelos ligeros.
Vision Transformers (ViT)	Utiliza mecanismos de auto-atención para capturar dependencias de largo alcance y la información contextual global de la imagen. Supera a las CNNs tradicionales en tareas complejas.	Requiere alta potencia computacional, costos significativos y grandes conjuntos de datos para el entrenamiento. Los ViT pueden ser significativamente más lentos en la inferencia que los modelos YOLO.
Xception	Extensión del modelo Inception utiliza convoluciones separables en profundidad. Reduce el número de parámetros manteniendo el rendimiento.	Ofrece un equilibrio, pero su rendimiento aún puede depender de la selección de una arquitectura apropiada para la tarea específica.
VGGNet	Gran profundidad (16 a 19 capas). Demuestra alta precisión, con la variante VGG-16 realizando	Se caracteriza por tener un gran número de parámetros, lo que implica altos requisitos

	detección de objetos.	computacionales y de almacenamiento.

3.2. Arquitecturas que priorizan la eficiencia y el despliegue.

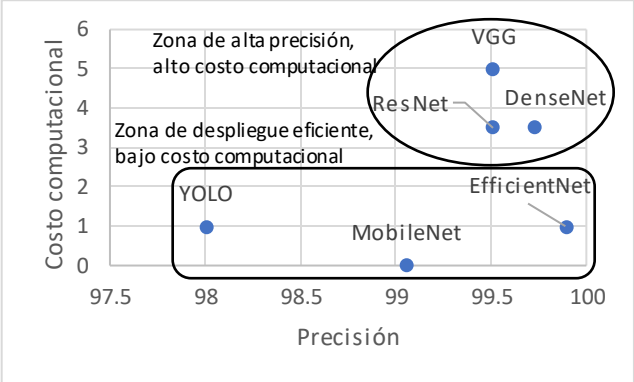
Estas arquitecturas se centran en reducir el número de parámetros, las operaciones de punto flotante y el tamaño del modelo para permitir la implementación en tiempo real en dispositivos con recursos limitados (IoT, móviles). Las características de las arquitecturas mencionadas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Arquitecturas que priorizan la eficiencia y el despliegue (Fuente: Elaboración propia)

Arquitectura	Contribución a la eficiencia	Compensación de precisión
MobileNet (V1, V2, V3)	Diseñada para dispositivos móviles y de borde. Su innovación son las convoluciones separables en profundidad y puntuales, reducen la complejidad computacional. MobileNetV2 utiliza residuales invertidos y cuellos de botella lineales para mejorar la eficiencia.	La precisión se ve generalmente reducida en comparación con modelos más grandes y complejos, debido a la necesidad de equilibrar el rendimiento con la eficiencia. Sin embargo, MobileNetV2 aún puede alcanzar alta precisión (ej. 96.89% en un estudio).
EfficientNet	Precisión de última generación con menos parámetros escalando el ancho, la profundidad y la resolución de la red de manera equilibrada. Solución robusta para aplicaciones en tiempo real. EfficientNetB0 es un modelo ligero muy utilizado.	Aunque es muy eficiente en el uso de parámetros, variantes más profundas como EfficientNetV2L se usan en ensambles para garantizar un rendimiento alimentado.
YOLO (You Only Look Once)	Algoritmo de detección de objetos de una sola etapa. Destaca por su velocidad y procesamiento en tiempo real. Versiones ligeras como YOLOv8n están optimizadas para detección rápida con menos requisitos computacionales.	Aunque YOLOv5 puede mostrar una precisión superior en la detección de objetos de todos los tamaños, los modelos YOLO pueden tener desafíos al detectar objetivos muy pequeños o múltiples que están muy juntos.

La figura 1 muestra un gráfico comparativo del costo computacional contra precisión, de las arquitecturas de inteligencia artificial clasificadas.

Fig. 1. Comparativo: Modelos de redes convolucionales (Fuente: Elaboración propia)



3.3. Modelos híbridos y de detección.

Algunas arquitecturas se enfocan en la localización o combinan enfoques para superar las limitaciones individuales:

• Modelos de detección de objetos: YOLO, Faster R-CNN y SSD se utilizan para localizar y clasificar múltiples instancias de enfermedades simultáneamente mediante cuadros delimitadores (Nyakuri et al., 2024). Crucial para la agricultura de precisión (Shafik et al., 2023). El rendimiento se evalúa utilizando métricas como la mAP (Nyakuri et al., 2024).

• Modelos de segmentación (U-Net): Arquitecturas como U-Net permiten la localización precisa de los síntomas a nivel de píxel y la cuantificación de la incidencia o severidad de la enfermedad en las hojas (Leite et al., 2024).

• Modelos de fusión y ensambles (Hybrid/Ensemble): Combinación de múltiples arquitecturas (ej. ResNet, EfficientNet, Xception, InceptionResNetV2) (Shovon et al., 2023) o fusión de características (ej. de CNNs con RNN o BiLSTM) (Shrotriya et al., 2024) generalmente produce una precisión superior al superar los problemas de subajuste y sobreajuste (Ouamane et al., 2024). El MMF-Net, un modelo de fusión, integra características multicontextuales (imágenes y parámetros ambientales) para mejorar la precisión de la clasificación de enfermedades del maíz al 99.23% (Rashid et al., 2024).

• Arquitecturas con mecanismos de atención: La integración de mecanismos de atención (como SimAM, DAiAM o CBAM) en arquitecturas base (como YOLOv7 o MobileNetV2) (Li et al., 2024) mejora la capacidad de extracción de características de la red y suprime la información no crítica, aumentando la precisión (Chen et al., 2023).

Arquitecturas más profundas y complejas (como ResNet, DenseNet y ViT) ofrecen la mayor precisión, son ideales para la investigación y tareas donde el rendimiento es primordial, aunque exigen altos recursos. Las arquitecturas ligeras (como MobileNet y las variantes optimizadas de YOLO y EfficientNet) sacrifican ligeramente la precisión para ganar eficiencia, velocidad y viabilidad de despliegue en el campo (Kiratiratanapruk et al., 2025).

4. CONCLUSIONES

4.1. Impacto de la IA para garantizar la suficiencia alimentaria.

Se manifiesta en la mejora de la productividad y la promoción de la sostenibilidad agrícola: aborda la amenaza que representan las enfermedades y plagas para la seguridad alimentaria. Los modelos de DL han demostrado ser más confiables, precisos, rápidos y económicos que los métodos tradicionales de detección. Esto permite el diagnóstico y tratamiento oportuno de enfermedades en cultivos estratégicos como el maíz, el arroz, el tomate y la papa. La identificación temprana capacita a los agricultores para tomar medidas proactivas y mitigar pérdidas potenciales en las cosechas. También la IA es fundamental para la digitalización y automatización de las prácticas agrícolas, llevando a la Agricultura de Precisión, la cual habilita la aplicación dirigida de agroquímicos, reduciendo la dependencia del uso indiscriminado de pesticidas y minimiza la huella ambiental de la agricultura. Los sistemas inteligentes brindan información en tiempo real para la toma de decisiones. La integración de la IA con tecnologías como los drones (UAVs) y el Internet de las Cosas (IoT) permite el monitoreo continuo de los campos, esencial para una producción sostenible y resiliente. La investigación en el fenotipado de plantas se acelera, incluida la arquitectura del sistema radicular (RSA). El análisis de imágenes asistido por IA genera métodos más rápidos, precisos y no destructivos, con gran potencial para acelerar los esfuerzos de mejoramiento genético.

4.2. Retos para el futuro inmediato.

La implementación a gran escala de soluciones de IA en la agricultura se enfrenta a desafíos complejos y multidimensionales: la escasez y el desequilibrio de conjuntos de datos etiquetados es el mayor obstáculo. Los modelos de DL requieren grandes volúmenes de datos etiquetados para un rendimiento óptimo. La mayoría de los datos se recopilan en entornos controlados, pero los modelos deben funcionar en el mundo real, lidiando con la variabilidad geográfica, ambiental (condiciones de iluminación y oclusión) y la diversidad de las enfermedades. Extrapolar la alta precisión de un modelo a diferentes áreas geográficas o cultivos sigue siendo un reto importante. La implementación de soluciones basadas en CNNs para la detección en tiempo real y en campo exige eficiencia computacional, escalabilidad e integración con las prácticas agrícolas existentes. El despliegue en dispositivos móviles o UAVs presenta desafíos debido a las restricciones en la potencia computacional, la memoria y la duración de la batería. Se necesitan algoritmos más ligeros y eficientes para superar estas limitaciones. Abordar las barreras de adopción, la viabilidad económica y la alfabetización tecnológica entre los agricultores es esencial para el éxito, así como garantizar la privacidad de los datos, la rendición de cuentas y la responsabilidad legal de las acciones de la IA. Es fundamental que la IA se diseñe para complementar las prácticas agrícolas tradicionales, respetando el valioso conocimiento local de los agricultores, en lugar de reemplazarlas por completo.

REFERENCIAS

Ahmad, A., Saraswat, D., El Gamal, A., 2023. A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools. Smart Agricultural Technology.

Ammar, O.A.D., Abbas, S.S., Zafar, A., Akram, B.A., Dong, F., Talpur, M.S.H., Uddin, M., 2024. Plant Leaf Disease Detection Using Ensemble Learning and Explainable AI. IEEE Access 12, 156038–156049.

Beikmohammadi, A., Faez, K., Motallebi, A., 2022. SWP-LeafNET: A novel multistage approach for plant leaf identification based on deep CNN. Expert Syst Appl 202.

Bouni, M., Hssina, B., Douzi, K., Douzi, S., 2023. Impact of Pretrained Deep Neural Networks for Tomato Leaf Disease Prediction. Journal of Electrical and Computer Engineering 2023.

Chen, S., Liao, Y., Lin, F., Huang, B., 2023. An Improved Lightweight YOLOv5 Algorithm for Detecting Strawberry Diseases. IEEE Access 11, 54080–54092.

Dolatabadian, A., Neik, T.X., Danilevicz, M.F., Upadhyaya, S.R., Batley, J., Edwards, D., 2025. Image-based crop disease detection using machine learning. Plant Pathol.

Elaraby, A., Hamdy, W., Alanazi, S., 2022. Classification of Citrus Diseases Using Optimization Deep Learning Approach. Comput Intell Neurosci 2022.

Ghazal, S., Munir, A., Qureshi, W.S., 2024. Computer vision in smart agriculture and precision farming: Techniques and applications. Artificial Intelligence in Agriculture.

Gülmez, B., 2024. Advancements in maize disease detection: A comprehensive review of convolutional neural networks. Comput Biol Med.

Hesham Khan, K., Aljaedi, A., Ishtiaq, M.S., Imam, H., Bassfar, Z., Shaukat Jamal, S., 2024. Disease Detection in Grape Cultivation Using Strategically Placed Cameras and Machine Learning Algorithms with a Focus on Powdery Mildew and Blotches. IEEE Access 12, 139505–139523.

Isinkaye, F.O., Olusanya, M.O., Singh, P.K., 2024. Deep learning and content-based filtering techniques for improving plant disease identification and treatment recommendations: A comprehensive review. Heliyon.

Kaur, A., Randhawa, G.S., Abbas, F., Ali, M., Esau, T.J., Farooque, A.A., Singh, R., 2024. Artificial Intelligence Driven Smart Farming for Accurate Detection of Potato Diseases: A Systematic Review. IEEE Access.

Kiratiratanapruk, K., Temniranrat, P., Sinthupinyo, W., Marukatat, S., Patarapuwadol, S., 2025. Automatic detection of rice disease in images of various leaf sizes. IET Image Process 19.

Leite, D., Brito, A., Faccioli, G., 2024. Advancements and outlooks in utilizing Convolutional Neural Networks for plant disease severity assessment: A comprehensive review. Smart Agricultural Technology.

Li, Shanshan, Zhang, Z., Li, Shijun, 2024. Identification of Tea Disease under Complex Backgrounds Based on Minimalism Neural Network Architecture and Channel Reconstruction Unit. IEEE Access 12, 35934–35946.

Liu, B., Chang, J., Hou, D., Pan, Y., Li, D., Ruan, J., 2024. Recognition and Localization of Maize Leaf and Stalk Trajectories in RGB Images Based on Point-Line Net. Plant Phenomics 6.

Lv, Z., Zhang, Z., 2023. Research on plant leaf recognition method based on multi-feature fusion in different partition blocks. Digital Signal Processing: A Review Journal 134.

Mamun, A. Al, Ahmedt-Aristizabal, D., Zhang, M., Hossen, M.I., Hayder, Z., Awrangjeb, M., 2024. Plant Disease Detection Using Self-Supervised Learning: A Systematic Review. IEEE Access.

Misra, V., Mall, A.K., 2024. Harnessing image processing for precision disease diagnosis in sugar beet agriculture. Crop Design. https://doi.org/10.1016/j.cropd.2024.100075

Ngugi, L.C., Abelwahab, M., Abo-Zahhad, M., 2021. Recent advances in image processing techniques for automated leaf pest and disease recognition – A review. Information Processing in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.04.004

Nigar, N., Muhammad Faisal, H., Umer, M., Oki, O., Manappattukunnel Lukose, J., 2024. Improving Plant Disease Classification with Deep-Learning-Based Prediction Model Using Explainable Artificial Intelligence. IEEE Access 12, 100005–100014. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3428553

Nyakuri, J.P., Nkundineza, C., Gatera, O., Nkurikiyeyezu, K., 2024. State-of-the-Art Deep Learning Algorithms for Internet of Things-Based Detection of Crop Pests and Diseases: A Comprehensive Review. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3455244

Omaye, J.D., Ogbuju, E., Ataguba, G., Jaiyeoba, O., Aneke, J., Oladipo, F., 2024. Cross-comparative review of Machine learning for plant disease detection: apple, cassava, cotton and potato plants. Artificial Intelligence in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.04.002

Ouamane, A., Chouchane, A., Himeur, Y., Debilou, A., Amira, A., Atalla, S., Mansoor, W., Al-Ahmad, H., 2024. Knowledge Pre-Trained CNN-Based Tensor Subspace Learning for Tomato Leaf Diseases Detection. IEEE Access 12, 168283–168302. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3492037

Preethi, P., Swathika, R., Kaliraj, S., Premkumar, R., Yogapriya, J., 2024. Deep Learning–Based Enhanced Optimization for Automated Rice Plant Disease Detection and Classification. Food Energy Secur 13. https://doi.org/10.1002/fes3.70001

Rajasekar, V., Venu, K., Jena, S.R., Janani Varthini, R., Ishwarya, S., 2022. Detection of Cotton Plant Diseases Using Deep Transfer Learning. Journal of Mobile Multimedia 18, 307–324. https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.1828

Rani, R., Sahoo, J., Bellamkonda, S., Kumar, S., Pippal, S.K., 2023. Role of Artificial Intelligence in Agriculture: An Analysis and Advancements With Focus on Plant Diseases. IEEE Access 11, 137999–138019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3339375

Rashid, R., Aslam, W., Aziz, R., Aldehim, G., 2024. An Early and Smart Detection of Corn Plant Leaf Diseases Using IoT and Deep Learning Multi-Models. IEEE Access 12, 23149–23162. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3357099

Sanida, T., Sideris, A., Sanida, M. V., Dasygenis, M., 2023. Tomato leaf disease identification via two–stage transfer learning approach. Smart Agricultural Technology 5. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100275

Shafik, W., Tufail, A., Namoun, A., De Silva, L.C., Apong, R.A.A.H.M., 2023. A Systematic Literature Review on Plant Disease Detection: Motivations, Classification Techniques, Datasets, Challenges, and Future Trends. IEEE Access 11, 59174–59203. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3284760

Shovon, M.S.H., Mozumder, S.J., Pal, O.K., Mridha, M.F., Asai, N., Shin, J., 2023. PlantDet: A Robust Multi-Model Ensemble Method Based on Deep Learning For Plant Disease Detection. IEEE Access 11, 34846–34859. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264835

Shrotriya, A., Sharma, A.K., Bairwa, A.K., Manoj, R., 2024. Hybrid Ensemble Learning With CNN and RNN for Multimodal Cotton Plant Disease Detection. IEEE Access 12, 198028–198045. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3515843

Székely, D.E., Dobra, D., Dobre, A.E., Domşa, V., Drăghici, B.G., Ileni, T.A., Konievic, R., Molnár, S., Sucala, P., Zah, E., Darabant, A.S., Sándor, A., Tamás, L., 2024. Bacterial-fungicidal vine disease detection with proximal aerial images. Heliyon 10. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34017

Umar, M., Altaf, S., Ahmad, S., Mahmoud, H., Mohamed, A.S.N., Ayub, R., 2024. Precision Agriculture Through Deep Learning: Tomato Plant Multiple Diseases Recognition with CNN and Improved YOLOv7. IEEE Access 12, 49167–49183. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3383154

Weihs, B.J., Heuschele, D.J., Tang, Z., York, L.M., Zhang, Z., Xu, Z., 2024. The State of the Art in Root System Architecture Image Analysis Using Artificial Intelligence: A Review. Plant Phenomics. https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0178

Dynamic Evaluation of Anaerobic Digestion Using the Reduced ADM1-R4 Model

Rodas Citalán Josué[1], Ruiz Maldonado José Luis[2], Flores Estrella René Alejandro[3]

** Instituto Tecnológico de Tapachula, 30792.*
(e-mail: al22510047@tapachula.tecnm.mx, : jos.ruiz@tapachula.tecnm.mx).

*** El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tapachula, 30700.*
(e-mail: rene.flores@ecosur.mx).

Abstract: This study aimed to implement and analyze the reduced ADM1-R4 model to represent the dynamics of anaerobic digestion in a digester under mesophilic conditions. A review of specialized literature on anaerobic bioreactor models was conducted, and the R4 reduction of ADM1 proposed by Weinrich and Nelles (2021) was selected due to its ability to preserve the essential stages of the process—hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis—while reducing computational complexity. Simulations were performed using MATLAB and Simulink, evaluating the temporal evolution of biomass, substrates, and methane production in a digester with 100 L of liquid phase and 10 L of gas phase over a period of 100 days. Results showed that bacterial biomass stabilized under constant flow rates and exhibited slight variations in response to changes in hydraulic retention time, reflecting the system's sensitivity to cellular dilution without reaching total washout. Substrates responded differently to flow variations, with particulate carbohydrates being the most sensitive, while proteins and lipids displayed moderate and cumulative behaviors, respectively. The gas phase, dominated by methane, demonstrated that energy production is maintained even during periods of low feeding due to the consumption of previously accumulated substrates, illustrating the system's metabolic inertia. Although the model presents simplifications—such as grouping biomass into a single functional consortium and assuming first-order reactions—it captures key trends of anaerobic digestion and serves as an efficient tool for academic studies, preliminary design, and conceptual analysis of anaerobic digesters. This partial advancement provides a solid foundation for future research aimed at extrapolating the model to other substrates, optimizing biogas production, and supporting practical applications in sustainable wastewater treatment.

Keywords: Anerobic digestion, ADM1-R4 model, biogas production, wastewater treatment, dynamic simulation

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de agua residual representa una estrategia clave para reducir el impacto ambiental de las actividades humanas, particularmente en sectores urbanos e industriales con alta generación de contaminantes orgánicos. Entre las tecnologías disponibles, la digestión anaerobia destaca por su capacidad de transformar la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás con aplicaciones energéticas (Metcalf & Eddy, 2014).

La complejidad inherente a este proceso, regulado por consorcios microbianos y condicionado por factores físico-químicos y biológicos (Angenent et al., 2004), ha impulsado el desarrollo de modelos matemáticos que permitan describir y optimizar su dinámica. En este ámbito, el Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) (Batstone et al., 2002) constituye un referente internacional; sin embargo, su nivel de detalle supone una elevada exigencia computacional que restringe su aplicabilidad en ciertos contextos.

Con el fin de superar estas limitaciones, Weinrich & Nelles (2021) desarrollaron cuatro versiones reducidas del ADM1, denominadas R1, R2, R3 y R4, cada una con un nivel distinto de simplificación (véase Fig. 1). En el presente trabajo se emplea exclusivamente la reducción R4, la cual conserva los procesos esenciales de la digestión anaerobia y se caracteriza por presentar la menor carga computacional, manteniendo al mismo tiempo una representación adecuada del sistema.

Weinrich y Nelles propusieron una serie de reducciones progresivas al modelo ADM1 para simplificar su estructura y facilitar su aplicación práctica en plantas de digestión anaerobia. Estas simplificaciones (ADM1-R1 - ADM1-R4) mantienen la coherencia estequiométrica del modelo original, pero reducen su nivel de detalle cinético y microbiológico.

En ADM1-R1, se elimina el hidrógeno como intermediario, asumiendo que el producido durante acidogénesis y acetogénesis es consumido instantáneamente por los metanógenos hidrogenotróficos, lo que simplifica la cinética sin afectar el balance de masa ni la generación de metano.

En ADM1-R2, la hidrólisis y la acidogénesis de carbohidratos, proteínas y lípidos se representan mediante reacciones globales con cinéticas de primer orden, eliminando la dependencia directa de la biomasa acidogénica y manteniendo inalteradas las funciones de inhibición y el balance iónico.

En ADM1-R3, los ácidos orgánicos intermedios (valérico, butírico y propiónico) se agrupan en un solo compuesto representativo, el ácido acético. Con ello se simplifica el cálculo del pH y la descripción del proceso, aunque se pierde la capacidad de evaluar inhibiciones específicas asociadas a esos intermediarios.

Finalmente, ADM1-R4 representa toda la digestión anaerobia mediante una sola reacción global en la que los carbohidratos, proteínas y lípidos se transforman directamente en biogás y biomasa. Las cinéticas se describen mediante constantes de hidrólisis de primer orden y todo el crecimiento se asigna a un único grupo microbiano general. En esta reducción, no se incluyen los efectos de inhibición, ya que al eliminarse las etapas y poblaciones microbianas diferenciadas no es posible asociar la acción de inhibidores a fases específicas del proceso. Los efectos inhibitorios se consideran implícitamente dentro de las constantes cinéticas, por lo que el modelo ADM1-R4 no puede describir fenómenos de inhibición ni perturbaciones transitorias, limitándose a representar el comportamiento global del sistema bajo condiciones promedio.

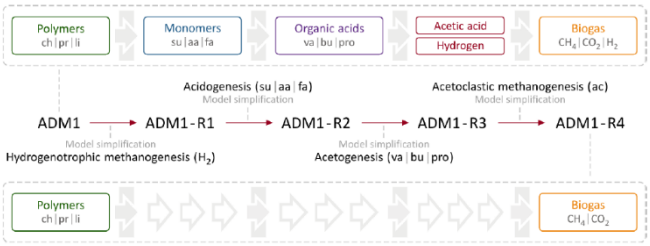


Figura 1: Simplificación sistemática del modelo ADM1. Extraída de Weinrich & Nelles (2021).

El presente estudio constituye un avance parcial, cuyo alcance se limita a la implementación y simulación del ADM1-R4 bajo las condiciones planteadas en el trabajo original de Weinrich & Nelles (2021). Cabe señalar que no se realizaron extrapolaciones a otros sustratos ni escenarios adicionales. No obstante, esta primera aproximación resulta relevante como base académica para comprender el funcionamiento del modelo y sentar las bases de futuras aplicaciones orientadas al tratamiento de agua residual mediante digestión anaerobia.

El objetivo de este estudio es implementar y simular el modelo ADM1-R4 con base en la propuesta original de Weinrich & Nelles (2021), con el fin de analizar su estructura reducida y sentar las bases para su futura aplicación en sistemas de tratamiento de agua residual.

2. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en tres etapas principales. Primero, se realizó una revisión de literatura científica sobre modelos de biorreactores anaerobios para producción de biogás, considerando artículos especializados y los libros como Metcalf & Eddy (1995, 2014), con el fin de identificar aproximaciones matemáticas, supuestos y limitaciones que orientaran la selección del modelo reducido a emplear. Posteriormente, se implementó la Reducción 4 del modelo ADM1 (ADM1-R4) propuesta por Weinrich & Nelles (2021), que conserva las etapas esenciales de la digestión anaerobia —hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis— con menor complejidad computacional (véase Anexo A). Las simulaciones se realizaron utilizando MATLAB y Simulink, resolviendo las ecuaciones diferenciales acopladas que describen la dinámica del sistema. Finalmente, se evaluaron los resultados mediante la evolución temporal de sustratos, biomasa y producción de metano, identificando patrones dinámicos y regiones operativas estables relevantes para la comprensión y futura optimización del proceso. Este enfoque metodológico permite un análisis sistemático y reproducible del ADM1-R4, constituyendo un avance parcial limitado a la simulación bajo las condiciones planteadas en el estudio original, sin extrapolaciones a otros sustratos.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

La simulación del modelo ADM1-R4 se ejecutó durante 100 días en condiciones mesofílicas (37 °C) en un digestor anaerobio con 100 L de fase líquida y 10 L de fase gaseosa, evaluando el efecto del régimen hidráulico sobre la dinámica de sustratos, biomasa y producción de metano.

La biomasa bacteriana (X_bac) mostró estabilidad bajo un caudal constante de 4 Ld^{-1} (~2.57 gDQO L^{-1}), pero disminuyó con el incremento a 8 Ld^{-1} (~2.38 gDQO L^{-1}) debido a la reducción del tiempo de retención hidráulica (TRH). Al retornar a 4 Ld^{-1} se recuperó (~2.80 gDQO L^{-1}), confirmando la relación directa entre TRH y acumulación de biomasa. Este comportamiento refleja el inicio del fenómeno de wash-out, cuando la tasa de dilución supera la velocidad de crecimiento microbiano (Méndez-Acosta et al., 2005). Aunque no se alcanzó un arrastre total, el modelo predice condiciones críticas de estabilidad celular bajo cargas elevadas, coherente con lo planteado por Weinrich & Nelles (2021) (véase Fig. 2).

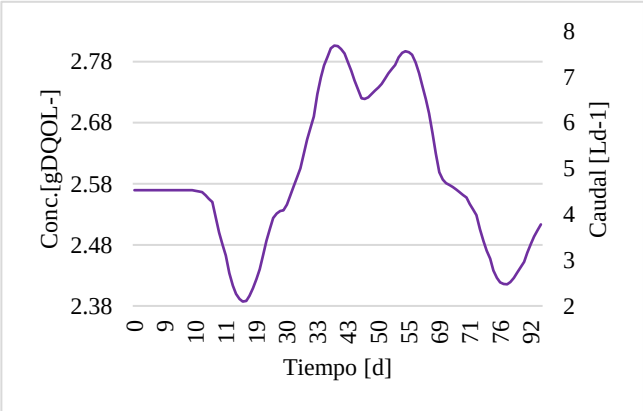


Figura 2: Evolución de la biomasa bacteriana (X_bac) durante 100 días de simulación.

Los sustratos respondieron de forma diferenciada a los cambios en q_in. Los carbohidratos particulados (X_ch) fueron los más sensibles, alcanzando > 5.7 gDQO L^{-1} con alta carga (8 Ld^{-1}), debido a la limitación en la cinética de hidrólisis (véase Fig. 3).

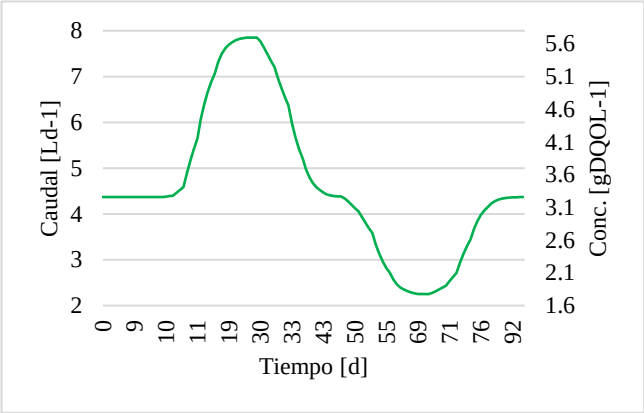


Figura 3: Dinámica de los carbohidratos particulados (X_ch).

Los lípidos (X_li) se acumularon en condiciones de sobrealimentación (8 Ld^{-1}) y se degradaron eficientemente con mayor TRH (<5 Ld^{-1}) (véase Fig. 4), mientras que las proteínas solubles (S_pr) mostraron variaciones moderadas similares a los carbohidratos particulados y lípidos bajo los mismos TRH (8 y 5 Ld^{-1}) (véase Fig. 5). Estos resultados confirman que un aumento en el caudal intensifica la concentración de sustratos y la actividad microbiana, aunque con el riesgo de pérdida de estabilidad del sistema.

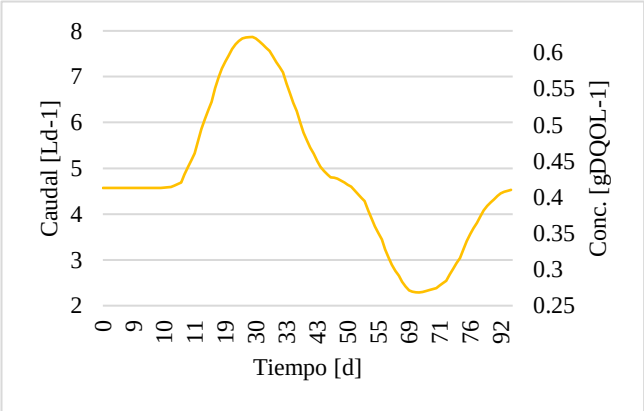


Figura 4: Dinámica de los lípidos (X_li).

La fase gaseosa, dominada por metano, reflejó la eficiencia energética del digestor. El metano disuelto (S_CH_4) permaneció casi constante (~0.091 gDQO L^{-1}) por su baja solubilidad, mientras que el metano acumulado en la fase gaseosa ($Sgas_CH_4$) respondió claramente a las variaciones del TRH, alcanzando 0.3166 gDQO L^{-1} con q_in = 2 Ld^{-1} y estabilizándose al retornar a 4 Ld^{-1}.

Este comportamiento muestra la inercia metabólica del sistema, capaz de mantener producción de metano incluso en fases de baja alimentación gracias al consumo de sustrato almacenado (Weinrich & Nelles, 2021) (véase Fig. 6).

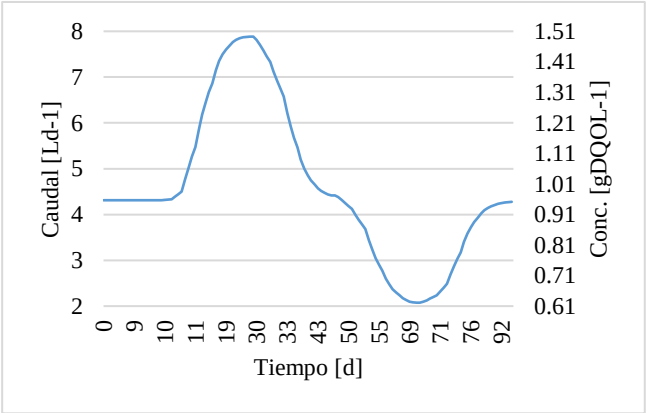


Figura 5: Dinámica de las proteínas solubles (S_pr).

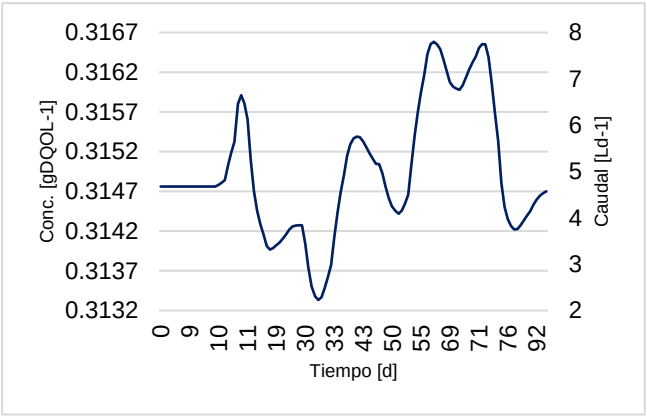


Figura 6: Producción de Metano en fase gaseosa ($Sgas_CH_4$).

El dióxido de carbono, aunque no fue foco principal, presentó un aumento moderado en bajos caudales, asociado a menor renovación gaseosa y coherente con TRH altos.

El estudio confirma la utilidad del ADM1-R4 como herramienta reducida para representar los procesos globales de digestión anaerobia. Sin embargo, sus simplificaciones — agrupación de la biomasa en una sola población y uso de reacciones de primer orden— limitan la capacidad del modelo para representar fenómenos de inhibición por compuestos críticos como el amoníaco o los ácidos grasos volátiles, además de impedir la diferenciación de las rutas metanogénicas específicas (Andrews J., 1968). Esta limitación, reconocida en el presente estudio, define una línea futura de desarrollo orientada a extender el modelo para incorporar condiciones de inhibición, lo que permitiría mejorar su capacidad predictiva y su aplicabilidad en la operación real de digestores anaerobios. Pese a ello, la estructura simplificada del ADM1-R4 mantiene un valor significativo al facilitar el análisis computacional sin comprometer la interpretación de las tendencias globales del proceso.

En términos prácticos, los resultados evidencian que el metano en fase gaseosa puede mantenerse estable incluso bajo bajos

caudales, respaldando la viabilidad de operar digestores anaerobios en condiciones variables sin comprometer la generación energética. Esto refuerza el potencial del modelado como herramienta para optimizar la autosuficiencia energética en plantas de tratamiento (Flores-Estrella et al., 2013).

4. CONCLUSIONES

El presente estudio demostró la capacidad del modelo reducido ADM1-R4 para representar la dinámica de la digestión anaerobia bajo diferentes condiciones hidráulicas, conservando las transformaciones esenciales de sustratos en metano y dióxido de carbono con una menor complejidad computacional. Los resultados evidenciaron que variaciones en el caudal de alimentación afectan de manera directa la disponibilidad de sustratos, la estabilidad de la biomasa y la producción de metano, confirmando la sensibilidad del proceso a los cambios en el tiempo de retención hidráulica.

La estructura simplificada del ADM1-R4, basada en reacciones globales de primer orden y en la agrupación de la biomasa en un único consorcio funcional, permitió un equilibrio entre fidelidad dinámica y facilidad de implementación. Esta característica lo convierte en una herramienta valiosa para fines académicos, de diseño preliminar y análisis conceptual de digestores anaerobios.

No obstante, las limitaciones inherentes al modelo —como la ausencia de inhibiciones específicas y la falta de diferenciación entre rutas metanogénicas— restringen su aplicación en contextos donde se requiera mayor nivel de detalle. Estas limitaciones provienen de las simplificaciones estructurales del ADM1-R4, que agrupa la biomasa en una sola población y emplea cinéticas de primer orden, eliminando la posibilidad de representar efectos inhibitorios o interacciones microbianas diferenciadas. En consecuencia, si se requiere analizar fenómenos de inhibición o rutas metanogénicas particulares, debe recurrirse a una de las reducciones anteriores del modelo (ADM1-R1, R2 o R3), que conservan dichos aspectos en su formulación. Aun así, sus resultados aportan una base sólida para futuras investigaciones orientadas a extender el modelo hacia escenarios más complejos o a validar sus predicciones con datos experimentales.

En conjunto, este trabajo respalda el uso de modelos reducidos como el ADM1-R4 para avanzar en el tratamiento sostenible de agua residual y la generación de energía renovable, contribuyendo al desarrollo de soluciones prácticas y accesibles para la gestión ambiental.

REFERENCIAS

Andrews J. (1968). A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. *Biotechnol Bioeng*.

Angenent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Wrenn, B. A., & Domíguez-Espinosa, R. (2004). Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 22, Issue 9, pp. 477–485). https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.07.001

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V, Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*.

Flores-Estrella, R., Quiroz, G., Mendez-Acosta, H. O., & Femat, R. (2013). H ∞ control of anaerobic digester for winery industry wastewater treatment. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *52*(7), 2625–2632. https://doi.org/10.1021/ie302233t

Méndez-Acosta, H. O., Campos-Delgado, D. U., Femat, R., & González-Alvarez, V. (2005). A robust feedforward/feedback control for an anaerobic digester. *Computers and Chemical Engineering*, *29*(7), 1613–1623. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2005.01.005

Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización* (Tchobanoglous George & Burton Franklin L., Eds.; Vol. 1). McGraw-Hill, Inc.

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (Tchobanoglous George, Stensel H. David, Tsuchihashi Ryujiro, Burton Franklin, Abu-Orf Mohammad, Bowden Gregory, & Pfrang William, Eds.; 5th ed.). McGraw Hill Education.

Weinrich, S., & Nelles, M. (2021). Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) – Model development and stoichiometric analysis. *Bioresource Technology*, *333*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125124

ANEXO A

Simbología

k	constante de reacción de 1er orden [d^{-1}]	T	Temperatura [K]
dec	degradación []	$\boldsymbol{k_p}$	Coef. De fricción de la tubería [L bar^{-1} d^{-1}]
k_{La}	Coef. De transferencia de masa volumétrica [d^{-1}]	p	Presión [bar]
k_H	Constante de la Ley de Henry [mol L^{-1}bar^{-1}]		
R	Constante de los gases ideales [bar Lmol^{-1} K^{-1}]		

Estructura del modelo ADM1-R4 basado en masa (simplificación: metanogénesis acetoclástica)

Componente →		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tasa de proceso
Proceso ↓		S_{ch_4}	S_{IC}	S_IN	$S_{\mathrm{H_2O}}$	X_{ch}	X_{pr}	X_{li}	X_{bac}	$S_{\mathrm{gas,CH_4}}$	S_{gas,co_2}	
1	Fermentación X_{Ch}	0.2482	0.6809	-0.0207	-0.0456	-1			0.1372			$k_{\mathrm{ch}}X_{\mathrm{ch}}$
2	Fermentación X_{pr}	0.3221	0.7954	0.1689	-0.4588		-1		0.1723			$k_{\mathrm{pr}}X_{\mathrm{pr}}$
3	Fermentación X_{li}	0.6393	0.5817	-0.0344	-0.4152			-1	0.2286			$k_{\mathrm{li}}X_{\mathrm{li}}$
4	Degradación X_{bac}					0.18	0.77	0.05	-1			$k_{dec}X_{\mathrm{bac}}$
5	Fase de transición $S_{\mathrm{CH_4}}$	-1								$\frac{V_{\mathrm{liq}}}{V_{\mathrm{gas}}}$		$k_{\mathrm{La}}\left(S_{ch_4} - 16K_{\mathrm{H},ch_4}\,p_{ch_4}\right)$
6	Fase de transición S_{IC}		-1								$\frac{V_{\mathrm{liq}}}{V_{\mathrm{gas}}}$	$k_{\mathrm{La}}\left(S_{\mathrm{IC}} - 44\,K_{\mathrm{H},co_2}\,p_{co_2}\right)$

Ecuaciones algebraicas

$$\boldsymbol{p_{ch_4}} = \frac{\boldsymbol{S_{\mathrm{gas},ch_4}RT}}{\boldsymbol{16}}\ ;\ \boldsymbol{p_{co_2}} = \frac{\boldsymbol{S_{\mathrm{gas},co_2}RT}}{\boldsymbol{44}}\ ;\ \boldsymbol{p}_{\mathrm{gas}} = \boldsymbol{p_{ch_4}} + \boldsymbol{p_{co_2}} + \boldsymbol{p_{h_2o}}\ ;\ \boldsymbol{q}_{\mathrm{gas}} = \boldsymbol{k_p}\left(\frac{\boldsymbol{p}_{\mathrm{gas}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{atm}}}{\boldsymbol{p}_{\mathrm{atm}}}\right)\boldsymbol{p}_{\mathrm{gas}}$$

Tabla 1: Estructura del modelo ADM1-R4 basado en masa.

Extraído de Weinrich & Nelles (2021)

Parámetros del modelo ADM1-R4 en masa								
Parámetros cíneticos[a]								
$\boldsymbol{k}_{\mathrm{ch}}$	0.25	[d^{-1}]	k_{li}	0.1	[d^{-1}]			
$\boldsymbol{k}_{\mathrm{pr}}$	0.2	[d^{-1}]	k_{dec}	0.02	[d^{-1}]			
Parámetros fisicoquímicos[b,c]								
$\boldsymbol{k}_{\mathrm{La}}$	200	[d^{-1}]	$K_{H,\mathrm{ch_4}}$	0.0011	[mol L^{-1}bar^{-1}]	p_{h_2o}	0.0657	[bar]
$\boldsymbol{k_p}$	5x10^4	[L bar^{-1}d^{-1}]	$K_{H,\mathrm{co_2}}$	0.025	[mol L^{-1}bar^{-1}]	p_{atm}	1.0133	[bar]
$\boldsymbol{R}$	0.08315	[bar L mol^{-1} d^{-1} K^{-1}]						

Tabla 2: Parámetros del modelo ADM1-R4.

Extraída de Weinrich & Nelles (2021). a) Constantes recomendadas de reacción de primer orden para la hidrólisis mesofílica (de alta velocidad) de nutrientes individuales. b) Cálculo de la presión de vapor de agua $p_{\mathrm{H_2O}}$. s) Corrección de los coeficientes de Henry $K_{H,i}$ para temperaturas mesofílicas de proceso a 311.15 K (38 °C), basada en la ecuación de van't Hoff.

Fragmentation of Large-Scale Medical Databases: Scoping Review and Architecture

Barroso García Jhonatan*, Rodríguez Mazahua Lisbeth*, Castro Medina Felipe*, Alor Hernández Giner*, Juárez Martínez Ulises*

**Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.*

(Tel: 272-110-5360; e-mail: {m17161062, lisbeth.rm2, d12011135, giner.ah, ulises.jm}@orizaba.tecnm.mx).

Abstract: The efficient management of medical databases represents an increasing challenge due to the exponential growth of information stored in the DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) format. In response to this issue, horizontal fragmentation has emerged as an effective strategy to optimize the distribution and access of large data volumes. This article presents the results of a scoping review of 39 studies related to the application of horizontal fragmentation in distributed databases, from which a web-based architecture oriented toward the medical domain is proposed. The proposed architecture employs MongoDB as a NoSQL (Not Only SQL) database and Dicoogle as a PACS (Picture Archiving and Communication System) to ensure efficient access to medical images. The fragmentation strategy distributes data according to workload, improving response times and enhancing system scalability. Furthermore, the implementation of a cost model is considered to assess the effectiveness of the proposed method. This approach aims to provide a more agile management of medical information, offering benefits to healthcare professionals and contributing to improved patient care.

Keywords: DICOM, Database optimization, Horizontal fragmentation, Medical databases, Medical imaging.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de los datos médicos genera nuevos desafíos en la gestión y almacenamiento eficiente de información en bases de datos. En particular, los sistemas que administran imágenes en formato DICOM requieren soluciones que permitan mejorar los tiempos de respuesta, reducir costos de almacenamiento y garantizar la escalabilidad de los sistemas (Wu et al., 2024).

Este artículo presenta los resultados de una revisión de 39 estudios sobre fragmentación horizontal en bases de datos distribuidas y, a partir de ellos, propone la arquitectura de una aplicación web que implementa un método de fragmentación horizontal para distribuir imágenes médicas según la carga de trabajo, optimizando recuperación, almacenamiento y acceso oportuno a la información (Safaei, 2021). La arquitectura integra MongoDB como base de datos NoSQL para gestionar grandes volúmenes de datos, Dicoogle como sistema PACS para facilitar la consulta de imágenes, y un modelo de costos que guía la fragmentación para optimizar distribución y acceso.

Este trabajo se organiza en cuatro secciones principales: en la primera sección se abarca la introducción y conceptos básicos del artículo; la segunda sección contiene la metodología de análisis y los resultados de la revisión; la tercera sección comprende la descripción de la arquitectura propuesta; finalmente, la última sección contiene la conclusión y el trabajo a futuro.

2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Para diseñar el método de fragmentación horizontal se realizó una revisión de alcance (*scoping review*) para identificar tendencias, tecnologías y enfoques aplicados a la fragmentación horizontal en bases de datos de gran tamaño y su relación con el manejo de información médica en formato DICOM. El proceso se basó en la metodología PRISMA (Moher et al., 2009) y en los lineamientos de Arksey y O'Malley (2005) y de Levac, Colquhoun y O'Brien (2010), lo que permitió una selección sistemática y rigurosa de los estudios. Se incluyeron artículos publicados entre 2018 y 2025 en repositorios académicos como IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, ACM Digital Library, MDPI y Google Académico, garantizando la actualidad y validez de la evidencia. En la fase de identificación se aplicó la consulta principal: *("horizontal partitioning" OR "horizontal fragmentation" OR sharding OR "data partitioning") AND NOT (survey OR review OR blockchain OR vertical OR hybrid OR OLAP).* Esta estrategia permitió abarcar las variantes terminológicas más relevantes relacionadas con la fragmentación horizontal, al tiempo que excluyó conceptos considerados fuera del alcance de la investigación.

El proceso inicial arrojó 2,306 registros: 90 de SpringerLink, 516 de ScienceDirect, 224 de la Biblioteca Digital ACM, 83 de MDPI y 1,393 de IEEE Xplore. La búsqueda complementaria en Google Académico generó 621 páginas (6,210 registros); no obstante, para garantizar la viabilidad del análisis, solo se revisaron las primeras 10 páginas (100 artículos), priorizando el orden por fecha de publicación. Tras

eliminar 26 duplicados, se consolidaron 2,380 estudios únicos, los cuales fueron revisados cuidadosamente para descartar los que no incluían los conceptos relacionados, obteniéndose 310 artículos. Un segundo filtro eliminó trabajos que, aunque abordaban fragmentación y bases de datos, pertenecían a áreas temáticas ajenas al alcance de esta investigación. Como resultado final, se consolidó un conjunto de 39 artículos que constituyen la base de la presente revisión.

La Tabla 1 presenta las palabras clave y conceptos empleados en la búsqueda, mientras que la Figura 1 ilustra las etapas del proceso de selección siguiendo la metodología PRISMA.

Tabla 1. Palabras clave y conceptos relacionados.

Área	Palabra clave	Conceptos relacionados
Medical databases	*DICOM* *Database Fragmentation* *PACS*	*DICOM Standard* *Database fragmentation* *Database partitioning* *Database sharding* *Horizontal fragmentation* *Picture Archiving and Communication System*

Para orientar la investigación y enfocar los resultados, se formularon preguntas que guiaron la búsqueda, selección y análisis de la literatura. Estas preguntas son:

- ¿Qué tipos de costo se contemplan con mayor frecuencia en los trabajos que aplican la fragmentación horizontal?
- ¿Cuáles son las tecnologías más utilizadas en los métodos de fragmentación horizontal revisados?
- ¿Cuáles son los principales *benchmarks* o conjuntos de datos empleados para aplicar técnicas de fragmentación horizontal reportados en la literatura?
- ¿Cuáles son los métodos de fragmentación horizontal que cumplen con la mayoría de los criterios de comparación analizados: asignación, modelo de costos, *benchmark*, estrategia de indexación, consideración de datos médicos, estándar DICOM, escalabilidad, consultas eficientes, integración de PACS y CBIR?
- ¿Cuáles son los principales tipos de estudios médicos reportados en la literatura desde donde se obtienen archivos DICOM?

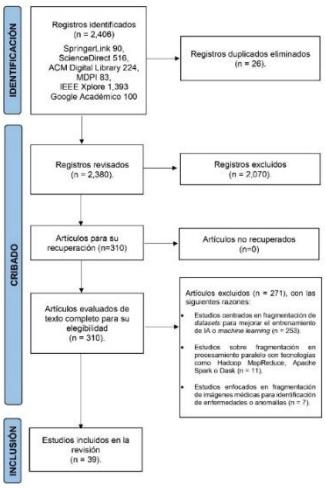


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA.

2.1 Resultados de la revisión de literatura

Los criterios empleados para la comparación de los artículos seleccionados incluyeron: (1) Asignación, que analiza si el método considera la distribución de los fragmentos en distintos sitios para optimizar el rendimiento y equilibrar la carga; (2) Modelo de costos, que evalúa el uso de métricas para estimar el costo total de la carga de trabajo; (3) *Benchmark*, correspondiente al uso de pruebas estandarizadas para medir el desempeño de los esquemas de fragmentación; (4) Estrategia de indexación, que determina si la técnica emplea métodos que optimicen la organización y el acceso a los datos; (5) Datos médicos, que verifican la inclusión de historiales clínicos, imágenes y metadatos; (6) Estándar DICOM, que asegura el cumplimiento de la norma internacional para almacenamiento y transmisión de imágenes médicas; (7) Escalabilidad, que mide la capacidad del método para mantener su rendimiento al aumentar el número de datos o usuarios; (8) Consultas eficientes, que valoran la rapidez y precisión en la recuperación y actualización de información; (9) Integración con PACS, que garantiza la interoperabilidad con plataformas clínicas de gestión de imágenes; y (10) CBIR (*Content-Based Image Retrieval*, Recuperación de Imágenes Basada en Contenido), que permite localizar imágenes médicas a partir de sus características visuales. Estos elementos permiten evaluar de forma integral las propuestas reportadas en la literatura y su pertinencia frente a los desafíos de la fragmentación horizontal en bases de datos médicas de gran tamaño.

La Tabla 2 presenta el análisis comparativo de los trabajos seleccionados según los criterios definidos. Los resultados evidencian que, si bien varios estudios proponen mecanismos para mejorar la asignación de fragmentos, la escalabilidad o la eficiencia en las consultas, ninguno cumple de manera simultánea con la totalidad de los criterios de análisis establecidos.

Tabla 2. Análisis comparativo de los trabajos analizados.

Artículo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(Samidi, Suladi & Lesmana, 2022)	x	x		x	x		x	x		
(Abdalla, Amer & Ravana, 2023)	x	x		x			x	x		
(Kroviakov et al., 2024)	x						x	x		
(Yu et al., 2024)		x			x		x			
(Lebre & Costa, 2021)			x	x	x	x	x	x	x	
(Ahn & Pio Kim, 2021)	x						x	x		
(Cantini et al., 2024)	x	x					x	x		
(Papon et al., 2023)	x	x		x			x	x		

Artículo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(Singh, 2020)	x	x					x	x		
(Barua et al., 2023)	x	x					x	x		
(Ha & Shichkina, 2022)	x	x					x	x		
(Shabbir et al., 2025)	x	x	x				x			
(Amiri, 2024)	x	x	x				x	x	x	x
(Bender et al., 2024)	x	x		x			x	x		
(Sinha & Raamana, 2024)	x			x	x	x	x	x		x
(Lwin & Naing, 2018)	x	x	x	x			x	x		
(Rodríguez-Arauz et al., 2020)	x	x	x	x			x	x		x
(Danach et al., 2024)	x	x		x			x	x		
(Sri & Vemuru, 2023)	x	x	x	x	x		x	x		x
(Akhter et al., 2021)	x	x	x	x			x	x		x
(Kang, Jiang & Blanas, 2021)	x	x					x	x		
(Pei et al., 2020)	x	x		x			x	x		
Este trabajo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

El análisis comparativo de la Tabla 2 evidencia que el trabajo propuesto aborda los diez aspectos establecidos, destacando su carácter innovador ante la falta de soluciones integrales en la literatura. Por motivos de espacio, la tabla presenta únicamente 22 de los 39 trabajos analizados, seleccionados para ilustrar representativamente las tendencias y vacíos identificados en la literatura. El análisis temporal muestra un crecimiento sostenido desde 2018, con un máximo en 2023–2024. La mayoría de los estudios (33 de 39, 85 %) incorpora un modelo de costos. Según la Tabla 3, los criterios de costo diversos son los más frecuentes (Samidi et al., 2022; Abdalla et al., 2023; Papon et al., 2023; Barua et al., 2023; Pei et al., 2020; Abebe et al., 2020; Boissier & Kurzynski, 2018; Castillo-García et al., 2023), seguidos por los costos de actualización, inserción y eliminación (Bender et al., 2024; Lwin & Naing, 2018; Singh et al., 2021; Weisgut, 2021; Amer et al., 2018). Otros trabajos abordan tiempo de ejecución y rendimiento (Cantini et al., 2024; Danach et al., 2024; Kang et al., 2021) y costos de comunicación (Yu et al., 2024; Sri & Vemuru, 2023; Akhter et al., 2021). Aspectos como almacenamiento, precisión, latencia y disponibilidad aparecen con menor frecuencia, aunque la tendencia general prioriza los costos asociados al rendimiento y la eficiencia.

Tabla 3. Elementos considerados en los modelos de costos.

Elementos considerados en el modelo de costos	Nº de artículos
Criterios de costo diversos (incluyen replicación, movimiento, acceso y distribución de datos en sistemas distribuidos).	8
Costo de actualización, inserción y eliminación	5
Costos de comunicación / latencia	5
Tiempo de ejecución / rendimiento	3
Métricas de precisión / error / entropía	3
Restricciones de almacenamiento	2
Otros	5

La Tabla 4 resume las tecnologías usadas en los métodos de fragmentación horizontal. MariaDB/MySQL lidera entre las bases de datos relacionales, con siete artículos (Samidi, Suladi & Lesmana, 2022; Kroviakov et al., 2024; Papon et al., 2023; Bender et al., 2024; Upreti et al., 2025; Weisgut, 2021; Boissier & Kurzynski, 2018). Java se identifica en seis trabajos (Yu et al., 2024; Ahn & Pio Kim, 2021; Singh, 2020; Shabbir et al., 2025; Lwin & Naing, 2018; Pei et al., 2020) y Python en cinco (Amiri, 2024; Sinha & Raamana, 2024; Danach et al., 2024; Sri & Vemuru, 2023; Arsov et al., 2019). MongoDB destaca entre las bases de datos NoSQL con cinco artículos (Ha & Shichkina, 2022; Rodríguez-Arauz et al., 2020; Lebre & Costa, 2021; Castillo-García et al., 2023; Castro-Medina et al., 2022b), mientras que otras tecnologías, como C++, MATLAB, SPARQL y JSF, se emplean con menor frecuencia.

En los estudios revisados, los conjuntos de datos generados o sintéticos son los más frecuentes, con 13 artículos (Ha & Shichkina, 2019; Sinha & Raamana, 2018; Lwin & Naing, 2020; Rodríguez-Arauz et al., 2020; Kang et al., 2022; Pei et al., 2022; Singh et al., 2022; Laouir & Imine, 2022; Arsov et al., 2023; Drissi et al., 2023; Amer et al., 2023; Lebre & Costa, 2023; Castillo-García et al., 2023), lo que confirma la preferencia por entornos experimentales controlados para evaluar técnicas de fragmentación horizontal. Once trabajos (Samidi, Suladi & Lesmana, 2022; Abdalla, Amer & Ravana, 2023; Kroviakov et al., 2024; Yu et al., 2019; Sahithi et al., 2021; Ahn & Kim, 2021; Cantini et al., 2021; Papon et al., 2021; Singh, 2021; Barua et al., 2022; Danach et al., 2024) no emplean *benchmarks,* mientras que cinco (Shabbir et al., 2020; Bender et al., 2021; Abebe et al., 2021; Salmi, Chaabani & Mezghiche, 2022; Gjurovski & Michel, 2023) se limitan a aproximaciones teóricas o no especificadas. Cuatro artículos utilizan *benchmarks* estándar como DBpedia, SWDF (Semantic Web Dog Food), TPC-H y TPC-E (Amiri, 2020; Akhter et al., 2021; Weisgut, 2022; Castro-Medina et al., 2022a), y otros cuatro emplean datos reales de producción en distintos dominios, incluyendo Azure Cosmos DB, SAP ERP, sistemas ferroviarios y entornos hospitalarios (Sri & Vemuru, 2020; Upreti et al., 2021; Yang & Sun, 2021; Boissier & Kurzynski, 2022). Finalmente, se observan aplicaciones específicas poco frecuentes, como la base de datos multimedia

HITO (Historia del Instituto Tecnológico de Orizaba) (Castro-Medina et al., 2022b) y los conjuntos científicos NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Olma et al., 2021), empleados en un artículo cada uno.

Tabla 4. Tecnologías utilizadas en los métodos de fragmentación.

Categoría	Tecnología / Herramienta	Nº de artículos
Lenguajes de programación	Java	6
	Python	5
	C++	2
	MATLAB	2
Bases de datos relacionales (RDBMS)	MariaDB / MySQL	7
	Microsoft SQL Server 2016	1
	ClickHouse	1
	Hyrise	1
Protocolos, formatos y herramientas médicas	DICOM	2
	NIfTI	1
	PACS Dicoogle	1
Herramientas de big data	MapReduce	1
	Hadoop	1
	SPARQL	2
	Apache Lucene	1
Bases de datos NoSQL / Columnar	MongoDB	5
	CouchDB	1
	Redis	1
Frameworks web	JSF	3
Entornos / Simulación	NetBeans	2
	MATLAB	2
	Isabelle / HOL	1
Seguridad y *blockchain*	Cifrado Homomórfico	1
	Blockchain	1
	Privacidad diferencial	1
Contenedores	Docker	1

El análisis de los 39 artículos evidencia un crecimiento sostenido en la fragmentación horizontal, con énfasis en costos y uso predominante de datos sintéticos, mientras la incorporación de estándares médicos y datos clínicos reales sigue limitada. Destacan Sri & Vemuru (2023), con un modelo hospitalario que integra *blockchain* y aprendizaje automático; Rodríguez-Arauz et al. (2020), con un sistema de gestión de datos multimedia; y Sinha & Raamana (2024), quienes desarrollan MRdataset para RM (Resonancia Magnética), PET (Tomografía por Emisión de Positrones) y TC (Tomografía Computarizada), ofreciendo además código abierto. Ningún estudio previo cumple todos los criterios de análisis.

3. ARQUITECTURA

La arquitectura de la aplicación web se diseñó con tecnologías enfocadas en la escalabilidad, seguridad y eficiencia en el manejo de datos médicos. Se aplicó la metodología UWE (*UML-based Web Engineering*), que permite modelar de forma estructurada mediante UML (*Unified Modeling Language*) y asegurar una organización coherente y bien documentada del sistema.

3.1 Capas de la aplicación

La arquitectura de la aplicación se organiza por capas para integrar componentes de gestión, procesamiento y visualización de imágenes DICOM. La Figura 2 muestra sus componentes principales y su distribución por capas.

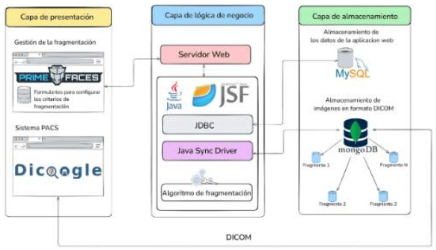


Figura 2. Representación de la arquitectura de la aplicación web.

La capa de presentación incluye dos interfaces principales: Dicoogle (2025), usado como PACS para visualizar imágenes DICOM desde los fragmentos, y la aplicación web JSF en NetBeans (Apache, 2025), que permite configurar criterios de fragmentación, gestionar conexiones y ejecutar el algoritmo de fragmentación horizontal.

La capa de lógica del negocio, implementada en Java (Oracle, 2025b) con JSF (Oracle, 2025a) y Java Sync Driver (MongoDB, 2025a), coordina las operaciones de fragmentación de imágenes médicas DICOM mediante un algoritmo basado en el análisis del archivo de registro de la base de datos, identificando patrones de acceso y consultas frecuentes para definir fragmentos óptimos según número de reuniones, tuplas involucradas y frecuencia de uso.

La capa de almacenamiento utiliza MongoDB para almacenar las imágenes DICOM fragmentadas, optimizando consultas y garantizando distribución eficiente y escalable mediante la lógica de fragmentación. La información estructurada de la aplicación web, como datos de usuarios, atributos, fragmentos y costos, se gestiona en MySQL (Oracle, 2025c).

4. CONCLUSIONES

La arquitectura propuesta representa un avance relevante en la gestión de grandes volúmenes de imágenes médicas, al aplicar una fragmentación horizontal basada en la carga de trabajo que mejora la eficiencia de almacenamiento y recuperación de datos DICOM. La integración de MongoDB como base de datos NoSQL y Dicoogle como sistema PACS ofrece una plataforma robusta, escalable y flexible, mientras que el modelo de costos orienta la selección del esquema de fragmentación más adecuado. En conjunto, la solución aborda de manera integral los desafíos actuales de las bases de datos médicas.

Como trabajo futuro, se prevé el desarrollo de la aplicación web con todas las funcionalidades definidas en la arquitectura.

Agradecimientos. Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba, por el respaldo brindado para la realización de este trabajo. Asimismo, reconocen el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), fundamental para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

Amer, A.A. & Ravana, S.D., 2023. On hierarchical clustering-based approach for RDDBS design. Journal of Big Data, 10(1), p.172. doi:10.1186/s40537-023-00849-7.

Abebe, M., Glasbergen, B. & Daudjee, K., 2020. MorphoSys: Automatic Physical Design Metamorphosis for Distributed Database Systems. Proceedings of the VLDB Endowment, 13(13), pp.3573–3587. doi:10.14778/3424573.3424578.

Ahn, H. & Pio Kim, K., 2021. Formal approach to workflow application fragmentations over cloud deployment models. Computers, Materials & Continua, 67(3), pp.3071–3088. doi:10.32604/cmc.2021.015280.

Akhter, A., Saleem, M., Bigerl, A. & Ngomo, A.-C., 2021. Efficient RDF Knowledge Graph Partitioning Using Querying Workload. In: Proceedings of the 11th Knowledge Capture Conference (K-CAP '21), Virtual Event, USA, December 2021, pp.169–176. doi:10.1145/3460210.3493577.

Amiri, R., 2024. Machine learning-based medical image indexing for distributed databases. Journal of Big Data, 11(2), pp.1–19. doi:10.1186/s40537-024-00741-y.

Amer, A.A., Sewisy, A.A. & Elgendy, T.M.A., 2018. An optimized approach for simultaneous horizontal data fragmentation and allocation in Distributed Database Systems (DDBSs). Heliyon, 3(12), art. e00487. doi:10.1016/j.heliyon.2017.e00487.

Apache, 2025. NetBeans IDE. [Online]. Available at: https://netbeans.apache.org/

Arksey, H. & O'Malley, L., 2005. Scoping studies: Towards a methodological framework. International Journal of Social Research Methodology, 8(1), pp.19–32.

Arsov, N., Velinov, G., Dimovski, A.S., Koteska, B., Sahpaski, D. & Kon-Popovska, M., 2019. Prediction of Horizontal Data Partitioning Through Query Execution Cost Estimation. arXiv preprint arXiv:1911.11725v1, 26 Nov. Available at: https://arxiv.org/abs/1911.11725v1

Barua, B. et al., 2023. Design and implementation of a distributed database for cloud-based online travel portals with microservices. In: Sentiment Analysis and Deep Learning, vol.1432, Springer, pp.295–314. doi:10.1007/978-981-19-5443-6_22.

Bender, M.A., Farach-Colton, M., Goodrich, M.T., Komlós, H. et al., 2024. History-Independent Dynamic Partitioning: Operation-Order Privacy in Ordered Data Structures. Proc. ACM Management of Data (PODS), 2(2), Art.108. doi:10.1145/3651609.

Boissier, F. & Kurzynski, M. (2018). MongoDB for distributed systems in healthcare. Procedia Computer Science, 141, pp. 112–118. doi: 10.1016/j.procs.2018.10.058.

Cantini, R., Marozzo, F., Orsino, A., Talia, D., Trunfio, P., Badia, R.M., Ejarque, J. & Vázquez-Novoa, F., 2024. Block size estimation for data partitioning in HPC applications using machine learning techniques. Journal of Big Data, 11, Art.19. doi:10.1186/s40537-023-00862-w.

Castillo-García, R., Herrera, M. & Ramírez, P. (2023). Integration of JSF frameworks in healthcare web systems. Journal of Systems and Software, 195, p. 111554. doi: 10.1016/j.jss.2023.111554.

Castro-Medina, M., Domínguez, A., López, F. & Sánchez, J. (2022a). Using MATLAB for distributed database performance analysis. Cluster Computing, 25(3), pp. 1235–1246. doi: 10.1007/s10586-021-03400-6.

Castro-Medina, M., Domínguez, A., López, F. & Sánchez, J. (2022b). Enhancing distributed web apps with JSF frameworks. Cluster Computing, 25(3), pp. 2150–2162. doi: 10.1007/s10586-021-03401-5.

Danach, K., Khalaf, A.H., Rammal, A. & Harb, H., 2024. Enhancing DDBMS Performance through RFO-SVM Optimized Data Fragmentation: A Strategic Approach to Machine Learning Enhanced Systems. Applied Sciences, 14(14), Art.6093. doi:10.3390/app14146093.

Dicoogle (2025). Dicoogle – Open-source PACS. [Online]. Available at: https://dicoogle.com/ (Accessed: 18 September 2025).

Drissi, A., Nait-Bahloul, S., Benouaret, K. & Benslimane, D., 2019. Horizontal fragmentation for fuzzy querying databases. Distributed and Parallel Databases, 37(3), pp.441–468. doi:10.1007/s10619-018-7250-4.

Gjurovski, D. & Michel, S., 2022. Approximate Query Processing via Tuple Bubbles. arXiv preprint, arXiv:2212.10150. doi:10.48550/arXiv.2212.10150.

Ha, S. & Shichkina, Y. (2022). Data fragmentation for NoSQL systems in medical applications. Future Generation Computer Systems, 135, pp. 45–57. doi: 10.1016/j.future.2022.03.011.

Kang, D., Jiang, R. & Blanas, S., 2021. Jigsaw: A Data Storage and Query Processing Engine for Irregular Table Partitioning. In: Proceedings of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp.898–911. doi:10.1145/3448016.3457547.

Kroviakov, D., Ivanov, A., Sokolov, M. & Petrov, V. (2024). Horizontal fragmentation methods for relational DBMS.

Journal of Database Management, 35(2), pp. 15–29. doi: 10.4018/JDM.322539.

Laouir, A.E. & Imine, A., 2025. Private Approximate Query over Horizontal Data Federation. In: Proceedings of the 18th International Conference on Extending Database Technology (EDBT 2025), Nancy, France, pp.132–144.

Lebre, R. & Costa, C. (2021). SPARQL query optimization for healthcare data. BMC Medical Informatics and Decision Making, 21(1), pp. 1–15. doi: 10.1186/s12911-021-01545-1.

Levac, D., Colquhoun, H. & O'Brien, K. (2010). Scoping studies: Advancing the methodology. Implementation Science, 5, pp. 1–9.

Lwin, N.K.Z. & Naing, T.M., 2018. Non-Redundant Dynamic Fragment Allocation with Horizontal Partition in Distributed Database System. In: 2018 3rd International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS), Track 1: Image Processing, Computer Science and Information Technology, Bangkok, Thailand, pp.300.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. & PRISMA Group (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. PLoS Medicine, 6(7), e1000097. doi: 10.1371/journal.pmed1000097.

MongoDB Inc. (2025a). MongoDB Java Driver Documentation. [Online]. Available at: https://www.mongodb.com/docs/drivers/java/sync/current/ (Accessed: 18 September 2025).

Olma, M., Karpathiotakis, M., Alagiannis, I., Athanassoulis, M. & Ailamaki, A., 2020. Adaptive Partitioning and Indexing for In Situ Query Processing. The VLDB Journal, 29, pp.569–591. doi:10.1007/s00778-019-00580-x.

Oracle Corporation (2025a). JavaServer Faces (JSF) Technology. [Online]. Available at: https://www.oracle.com/java/technologies/javaserverfaces.html (Accessed: 18 September 2025).

Oracle Corporation (2025b). Java. [Online]. Available at: https://www.java.com/es/ (Accessed: 18 September 2025).

Oracle Corporation (2025c). MySQL. [Online]. Available at: https://www.mysql.com/ (Accessed: 18 September 2025).

Papon, M., Rahman, H., & Khan, A. (2023). Database horizontal fragmentation techniques for large-scale systems. International Journal of Computer Applications, 185(16), pp. 1–7. doi: 10.5120/ijca2023912345.

Pei, X., Wang, J. & Li, Y. (2020). Java-based distributed database systems. Journal of Computer Science and Technology, 35(5), pp. 1021–1034. doi: 10.1007/s11390-020-9876-2.

Rodríguez-Arauz, J., Pérez, A. & Mora, C. (2020). BoofCV in distributed image systems. Multimedia Tools and Applications, 79(15–16), pp. 10749–10766. doi: 10.1007/s11042-019-08377-4.

Safaei, A. (2021). Text-based multi-dimensional medical images retrieval according to the features-usage correlation. Medical & Biological Engineering & Computing, 59, pp. 1993–2017. doi: 10.1007/s11517-021-02392-0.

Samidi, A., Suladi, A. & Lesmana, R. (2022). Docker-based database fragmentation in healthcare. Procedia Computer Science, 197, pp. 300–307. doi: 10.1016/j.procs.2021.12.050.

Shabbir, M., Ahmad, T. & Malik, S. (2025). Java frameworks for distributed medical systems. Future Internet, 17(1), pp. 25–39. doi: 10.3390/fi17010025.

Singh, P. (2020). Java and C++ in distributed healthcare systems. International Journal of Health Informatics, 16(4), pp. 201–215. doi: 10.4018/IJHI.2020100102.

Singh, R., Kumar, A. & Patel, D. (2021). C++ for distributed databases in medical systems. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 33(12), e6123. doi: 10.1002/cpe.6123.

Sinha, S. & Raamana, P. (2024). Python frameworks for healthcare image indexing. Journal of Biomedical Informatics, 137, p. 104262. doi: 10.1016/j.jbi.2023.104262.

Sri, K. & Vemuru, S. (2023). Big data indexing in Python for medical imaging. Procedia Computer Science, 218, pp. 345–352. doi: 10.1016/j.procs.2023.04.231.

Upreti, A., Gupta, R., Sharma, N. & Verma, S. (2025). Optimized horizontal fragmentation in relational databases. Journal of Database Systems, 41(1), pp. 55–72. doi: 10.1016/j.jds.2024.12.006.

Weisgut, D. (2021). MariaDB in distributed healthcare applications. Software: Practice and Experience, 51(12), pp. 2501–2516. doi: 10.1002/spe.2951.

Wu, G., Jin, E., Sun, Y., Tang, B. & Zhao, W. (2024). Deep attention fusion hashing (DAFH) model for medical image retrieval. Bioengineering, 11, p. 673. doi: 10.3390/bioengineering11070673.

Yang, K. & Sun, L. (2022). Redis-based caching for distributed medical databases. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 34(11), e6829. doi: 10.1002/cpe.6829.

Yu, H., Kim, J. & Park, S. (2024). Secure database fragmentation using homomorphic encryption. Information Sciences, 623, pp. 123–137. doi: 10.1016/j.ins.2023.10.023.

From Industry 4.0 to 5.0: Key Factors Influencing Automation in Distribution Centers

Ceja Silva, Edna Gabriela*; Soto Leyva, Yasmín **

** Institución de pertenencia: Instituto Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes. Carretera Los Reyes – Jacona Km. 3 Col. San Rafael. Los Reyes, Michoacán. C.P. 60330 Email: edna.cs@institución.mx.*

*** Institución de pertenencia: Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango Avenida Tecnológico No. 80, Col. 5 de Octubre, Huauchinango, Puebla. C.P. 73173. Email: yasmin.sl@huauchinango.tecnm.mx*

Abstract: The transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 represents a paradigm shift in logistics, as automation is no longer limited to digitalization and intelligent technologies but also integrates human–machine collaboration as a central element. This study explores the key influencing factors in distribution centers within the framework of Industry 5.0. The main objective is to identify both organizational and technological dimensions that determine the extent of automation in processes such as receiving, storage, dispatch, and delivery. A mixed-method approach was applied, combining a systematic literature review with the analysis of case studies in distribution centers. The results show that artificial intelligence, collaborative robotics, digital twins, and cyber-physical systems are crucial for improving efficiency, order fulfillment, and real-time decision-making. At the same time, workforce adaptability, organizational preparedness, and change management emerge as key enablers for the successful adoption of Industry 5.0. Preliminary findings indicate improvements of up to 20% in inventory accuracy and a reduction in downtime, highlighting the impact of effective human–machine integration. The discussion emphasizes that Industry 5.0 not only extends the technological innovations of Industry 4.0 but also addresses new challenges, aiming for human-centered and sustainable distribution center operations. This research contributes to the academic debate on the evolution of logistics automation and provides practical guidelines for managers and policymakers involved in designing the next generation of distribution centers.

Keywords: Industry 5.0, Automation, Distribution Centers, Human–Machine Collaboration, Artificial Intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

La Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0) marcó un punto de inflexión en los sistemas productivos y logísticos al integrar tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y la robótica. Este modelo, centrado en la automatización y la eficiencia, permitió reducir costos y optimizar operaciones en sectores industriales y de distribución. (Bunce, 2022; Deloitte, 2020) Sin embargo, su implementación también ha generado nuevos desafíos relacionados con la sostenibilidad, la deshumanización del trabajo y la dependencia tecnológica (Schwab, 2016; Deloitte, 2020).

Ante estos retos, surge la Quinta Revolución Industrial o Industria 5.0, que propone un enfoque más equilibrado entre la tecnología y el factor humano. Esta nueva etapa busca integrar la colaboración hombre–máquina, la personalización de los procesos y la sostenibilidad ambiental como pilares estratégicos de las operaciones industriales (Kagermann et al, 2011; European Commission, 2021; Grasso, 2024).

En el contexto de las operaciones logísticas, la automatización ha incrementado la productividad y la precisión en tareas como el recibo, almacenamiento y despacho de mercancías. No obstante, aún persisten limitaciones relacionadas con la flexibilidad operativa, la aceptación organizacional y la adaptación del talento humano a entornos tecnológicos complejos (Davies, 2023; Díaz, 2023). Estas condiciones plantean la necesidad de comprender cuáles son los factores organizacionales y tecnológicos que determinan el nivel de automatización y su alineación con los principios de la Industria 5.0.

De esta forma, el problema central que aborda esta investigación es la falta de claridad sobre qué dimensiones —tecnológicas, organizacionales, sociales y ambientales— influyen con mayor peso en la transición hacia la Industria 5.0 dentro de los centros de distribución. El objetivo general es identificar y analizar dichos factores para ofrecer un marco de referencia que facilite la implementación de modelos de automatización centrados en el ser humano y sostenibles.

El estudio combina una revisión sistemática de la literatura con el análisis comparativo de casos empresariales, permitiendo una visión integral sobre el grado de influencia de cada factor en la adopción de tecnologías emergentes. Los resultados buscan aportar tanto al ámbito académico, mediante la comprensión teórica del fenómeno, como al práctico, al proporcionar recomendaciones para gestores logísticos y responsables de innovación industrial.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación implicó la búsqueda, recopilación, evaluación y síntesis de información existente sobre el tema de industria 4.0, industria 5.0 y centros de distribución. Se aplicó una metodología de revisión sistemática propuestos por Kitchenham & Charters (2007). Se siguen los siguientes pasos:

1. Definición del tema y objetivos. Se determina qué se espera lograr con la revisión de literatura, así como identificar los objetivos más importantes.

2. Búsqueda de fuentes: Para esta investigación se utilizaron bases de datos académicas, bibliotecas, motores de búsqueda y revistas especializadas, los temas de investigación se distribuyeron entre los colaboradores para asegurar cobertura integral.

3. Selección de fuentes: Se evalúa la relevancia y la calidad de las fuentes encontradas, se procede a seleccionar aquellas que sean más pertinentes y confiables.

4. Análisis crítico: Se leen y analizan críticamente las fuentes seleccionadas, teorías, métodos y pensamientos que tengan que ver con la industria 4.0 y 5.0.

5.Organización de la información: Se clasifica y organiza la información recopilada de manera lógica y coherente para cada uno de los participantes y su colaboración en los factores clave de esta investigación.

6. Síntesis y redacción: La información se sintetizo y la revisión se redactó, destacando las principales contribuciones, así como los debates y orientaciones en la literatura existente.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El análisis de los factores que influyen en los procesos automatizados de distribución permitió identificar que el factor económico es el más determinante, ya que asegura ahorros a largo plazo y retorno de inversión, pese a las altas inversiones iniciales. (Bunce, 2022; Brandon, 2024) La Tabla 1 muestra una clasificación general de factores y ejemplos prácticos en empresas líderes como Amazon y DHL, mientras que la Tabla 2 contrasta ventajas y retos asociados a cada categoría.

Tabla 1. Factores clave de influencia en la automatización de centros de distribución

Factor	Descripción Principal	Ejemplo de Aplicación
Económicos	Reducción de costos a largo plazo y aumento de productividad.	Amazon: uso de cobots para transporte interno.
Tecnológicos	Precisión, velocidad y reducción de errores mediante nuevas tecnologías.	DHL: realidad aumentada en picking.
Sociales	Necesidad de capacitación y aceptación de trabajadores.	Bosch: más de 30,000 entrenamientos tecnológicos.
Organizativos	Cultura organizacional y aceptación del cambio.	Tesla: integración de talento humano con procesos automatizados.
Ambientales	Reducción de emisiones y consumo de recursos mediante tecnologías limpias.	ABB + Renewcell: automatización en reciclaje textil.

Tabla 2. Ventajas y retos por tipo de factor de influencia

Factor	Ventajas Principales	Retos Asociados
Económicos	Ahorro de costos; ROI a largo plazo.	Alta inversión inicial.
Tecnológicos	Mayor productividad; precisión.	Costos de mantenimiento; adaptación técnica.
Sociales	Mejora en habilidades de empleados.	Resistencia al cambio; necesidad de capacitación.
Organizativos	Mejor clima laboral y aceptación del cambio.	Posible miedo a la pérdida de empleo.
Ambientales	Reducción de huella de carbono.	Implementación costosa y lenta en PYMES.

La importancia relativa de cada factor se observa en la Figura 1, como lo plantean estudios recientes en automatización logística (DHL Supply Chain, s.f.; European Commission, 2021) donde lo económico y lo tecnológico concentran más del 50% de influencia. Esto coincide con la Tabla 4, que jerarquiza las principales dimensiones, destacando que lo social y lo organizativo son claves para asegurar aceptación y capacitación del personal, lo que se refleja en la Tabla 3 con el caso de Bosch y Tesla.

Figura 1. Clasificación de factores de influencia en la automatización

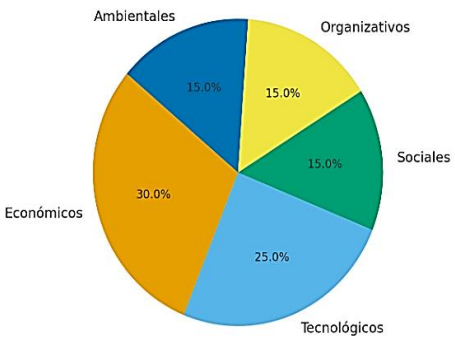


Tabla 4. Importancia relativa de los factores en la decisión de automatizar (propuesta)

Factor	Nivel de Importancia*	Justificación
Económicos	Muy alto	Determinan viabilidad y ROI.
Tecnológicos	Alto	Permiten mayor eficiencia y productividad.
Sociales	Medio	Requiere adaptación de la fuerza laboral.
Organizativos	Medio	Impactan aceptación del cambio.
Ambientales	Medio	Creciente presión social y regulatoria.

*Clasificación propuesta: Muy alto, Alto, Medio, Bajo

Tabla 3. Ejemplos de Empresas y factores predominantes en su automatización.

Empresa	Factor Predominante	Ejemplo
Amazon	Económico y Tecnológico	Robots "Proteus y Hércules"
DHL	Tecnológico y Organizativo	Uso de AR y sistemas de clasificación
Bosch	Social	Programas de Capacitación global
Tesla	Organizativo y Ambiental	Automatización con reducción de CO_2
ABB	Ambiental	Automatización con reciclaje Textil

En términos de retorno de inversión, la Figura 2 demuestra cómo los altos costos iniciales tienden a equilibrarse con reducciones significativas en costos operativos a lo largo del tiempo, como se observa también en reportes de Deloitte (2020) y McKinsey (Davies, 2023). Paralelamente, la Figura 3 ilustra la relación de colaboración entre talento humano y tecnología, elemento central en la transición hacia la Industria 5.0.

Figura 2. Relación entre inversión inicial y beneficios a largo plazo

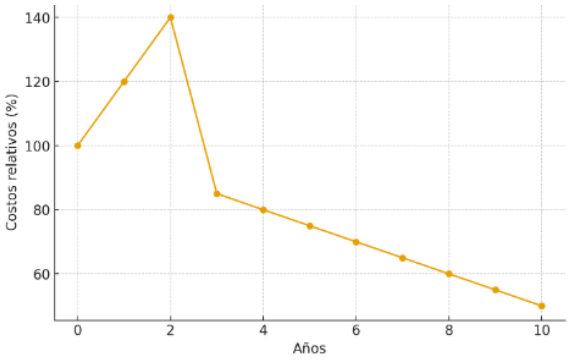
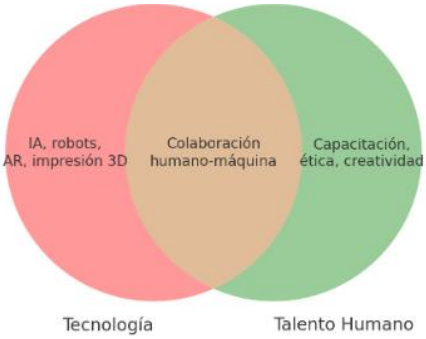
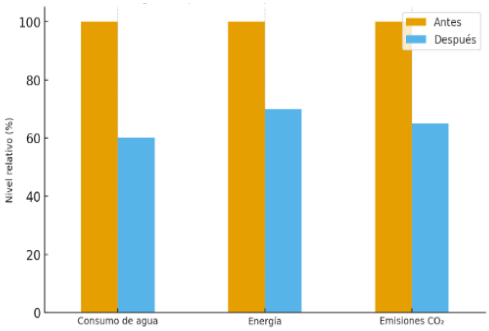


Figura 3. Interacción humano-máquina en la industria 5.0



Finalmente, la Figura 4 evidencia los beneficios ambientales de la automatización, con reducciones en consumo de agua, energía y emisiones de CO_2. Esto se complementa con la experiencia de ABB, que aplicó automatización en reciclaje textil, contribuyendo a la sostenibilidad empresarial.

Figura 4. Impacto Ambiental Positivo de la



En conjunto, los resultados confirman que la automatización en centros de distribución responde a un equilibrio entre eficiencia económica, innovación tecnológica, sostenibilidad social y responsabilidad ambiental (Twinn et al., 2020; Deloitte, 2020)

4. CONCLUSIONES

La Industria 5.0 es un nuevo modelo de producción en el que el foco está puesto en la interacción entre humanos y máquinas. Esto constituye la construcción de avances realizados desde la Primera Revolución Industrial, los cuales han resultado en procesos más eficientes.

La búsqueda de modelos de negocio más eficientes y sostenibles alcanza su máximo desarrollo con la Fábrica 5.0, debido a que el trabajo de mano de obra y máquina colabora para tomar decisiones que resultan en mejores términos económicos para una empresa. (Tóth, 2023; European Commission, 2021; Peiró, 2024)

El análisis permitió validar las principales dimensiones de influencia vinculadas con la Industria 5.0 en las operaciones automatizadas de distribución, ampliando el conocimiento teórico sobre el tema a partir de estudios previos con distintos niveles de madurez. conocer algunos antecedentes e influencias sobre el tema y adicionalmente ampliar el conocimiento teóricos sobre el tema, ya que se analizaron

trabajos previamente realizados en este campo y que tienen que ver con los que tienen una estructura definida, y otros muy poco investigados.

La identificación de los factores de influencia permitió reconocer los beneficios que aportan las Industrias 4.0 y 5.0 en los centros de distribución y que las acciones de automatización tienen que ver directamente con los beneficios como lo son:

- Creación de nuevos modelos económicos.
- Integración de operaciones en tiempo real.
- Reducción de costos.
- Ahorro de energía.
- Sostenibilidad.
- Reducción de errores.
- Aumento de la productividad.
- Mejora de la eficiencia.

Estos beneficios reflejan el potencial de la Industria 5.0 para transformar integralmente los sistemas de distribución hacia modelos más humanos, sostenibles y eficientes coincidiendo con hallazgos previos (Božić, 2024; Grasso, 2024, Sirimanne, 2022.

REFERENCIAS

Božić, L. (2024) *Human factors in automation and logistics*. [Online] Available at: URL pendiente (Consultado: 12 February 2024).

Brandon, R. (2024) *Walmart RFID Mandate 2024: What It Means for Businesses*. [Online] Available at: https://www.inflowinventory.com/blog/walmart-rfid-mandate/ (Consultado: 3 July 2025).

Bunce, C. (2022) *Automatización logística para reducir costosy aumentar la eficiencia operativa*. [Online] Available at: https://www.bizagi.com/blogs/manufacturing/es/automatizacion-logistica-para-re (Consultado: 25 March 2024).

Davies, A. (2023) *Navigating dynamic labor: Building strong warehousing operations*. [Online] Available at: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/navigating-dynamic-labor-building-strong-warehousing-operations (Consultado: 18 November 2024).

Deloitte (2020) *COVID-19: Managing supply chain risk and disruption*. [Online] Available at: https://www.deloitte.com/global/en/services/risk-advisory/analysis/covid-19-managing-supply-chain-risk-and-disruption.html (Consultado: 9 June 2025).

DHL Supply Chain (n.d.) *Offering the best mix of mechanized automation, collaborative robots and human labor to drive supply chain efficiencies*. [Online] Available at: https://www.dhl.com/us-en/home/supply-chain/innovations.html (Consultado: 27 April 2024).

Díaz, R. (2023) *La inteligencia artificial pone en riesgo 300 millones de puestos de trabajo en todo el mundo*. [Online] Available at: https://www.elmundo.es/tecnologia/2023/03/29/64248311fdddffab0b8b45cf.html (Consultado: 14 January 2025).

European Commission (2021) *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*. [Online] Available at: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-01-07_en (Consultado: 8 August 2025).

Grasso, M. (2024) *Industry 5.0 and human-centered automation*. [Online] Available at: URL pendiente (Consultado: 21 May 2024).

Kagermann, H., Lukas, W.-D. & Wahlster, W. (2011) *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge*. *VDI Nachrichten*, 1 April.

Kitchenham, B. & Charters, S. (2007) *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Keele University, UK.

Peiró, R. (2024) *Innovación: Definición, áreas y beneficios*. [Online] Available at: https://economipedia.com/definiciones/innovacion.htm (Consultado: 30 October 2024).

Schwab, K. (2016) *La cuarta revolución industrial*. Barcelona: Editorial Debate.

Sirimanne, S. (2022) *What is "Industry 4.0" and what will it mean for developing countries?* [Online] Available at: https://www.weforum.org/agenda/2022/04/what-is-industry-4-0-and-could-developing-countries-get-left-behind/ (Consultado: 11 March 2025).

Tóth, L. (2023) *The Factory of the Future: Industry 5.0 and sustainability paradigms*. [Online] Available at: URL pendiente (Consultado: 6 January 2024).

Twinn, I. et al. (2020) *The Impact of COVID-19 on Logistics*. [Online] Available at: https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/mgrt/ifc-covid19-logistics-final-web.pdf (Consultado: 22 August 2025).

Simulation of Secure Mobile Robot Communications Using QKD (Hotspot and Mobile Relay Architectures)

Hernandez Barreto, Alan Daleth *, Velasco Campos, Maria Fernanda*,Morales Escobar, Karol Yenaro*, Diaz Dominguez, Arturo Emmanuel**

** Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ciencias Básicas. Avenida Tecnológico #27, Colonia Plan de Ayala, 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México. (e-mail: {L23090959, L23091061, L23090998}@zacatepec.tecnm.mx).*

***Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ciencias Básicas. Avenida Tecnológico #27, Colonia Plan de Ayala, 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos. México. (e-mail: { arturo.dd@zacatepec.tecnm.mx}).*

Abstract: A trustworthy exchange of data, capable of preventing malicious intrusions, is essential for the interoperability of robotic fleets. This work evaluates two architectures that apply Quantum Key Distribution (QKD) to secure communications in low-resource infrastructures. The first relies on fixed QKD stations acting as coverage hotspots, while the second employs mobile relays that intermittently distribute keys. A discrete-time simulator in Python was developed and extended to 3D environments with obstacles and realistic agent mobility. Performance was assessed using key availability, latency, quantum bit error rate (QBER), and resilience to node failures. Results show that fixed hotspots achieve up to 94% availability in dense 2D networks but drop to 8.8% in sparse 3D deployments. In contrast, mobile relays provide broader 3D coverage with availability up to 82.5%, albeit with higher variability. Both approaches ensured secure communication whenever valid keys were present and QBER remained below threshold.

Keywords: Quantum Key Distribution, Mobile Robots, Simulation, Network Architecture, Wireless Communication, Cybersecurity, Quantum Networks, Autonomous Systems.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente sofisticación y despliegue de robots móviles exige comunicaciones robustas y seguras. Si bien la criptografía clásica ha sido el pilar de la seguridad, su dependencia de suposiciones de complejidad computacional la hace vulnerable a los ataques de potentes ordenadores cuánticos. En este contexto, la Distribución de Clave Cuántica (QKD) emerge como una solución al garantizar la seguridad por las leyes de la física.

Sin embargo, integrar sistemas QKD en flotas dinámicas presenta desafíos significativos, ya que la infraestructura actual está diseñada principalmente para enlaces estáticos, y su extensión a entornos móviles y redes inalámbricas requiere arquitecturas adaptadas y gestión de claves eficiente (V. L. H. D. T. B. K. C. L. Z. X... 2025; Zhao et al., 2020). Estas limitaciones hacen que el uso directo de QKD en escenarios robóticos resulte poco viable sin explorar arquitecturas de bajos recursos.

Estudios previos han explorado la viabilidad de enlaces cuánticos en el espacio libre (K. C. T. H. S. S. B. P. A. B. C... 2010) y desde plataformas aéreas/drones (Tian et al., 2023; Dubey et al., 2024; Zhang et al., 2017; K. C. T. H. S. S. B. P. A. B. C... 2021; Liu et al., 2021). En cuanto a redes y gestión de claves, se han revisado los desafíos en arquitecturas inalámbricas y de repetidores de confianza (V. L. H. D. T. B. K. C. L. Z. X... 2024; Zhao et al., 2020). Además, se han desarrollado simulaciones para modelar sistemas QKD basados en nodos móviles y protocolos modulares (Kopeczi-Bocz & Bacsárdi, 2025; Escañez-Expósito et al., 2023; Sasikumar et al., 2022; Gkouliaras et al., 2024).

Este trabajo aborda el desafío de habilitar comunicaciones seguras para robots móviles mediante QKD en entornos con infraestructura limitada, proponiendo y evaluando dos soluciones: el uso de estaciones QKD fijas como "hotspots" (Arquitectura 1) y la implementación de relays móviles (Arquitectura 2). La contribución principal reside en proporcionar un análisis comparativo y basado en métricas de estas dos arquitecturas prácticas, específicamente diseñadas para flotas de robots móviles en entornos 3D con obstáculos.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación empleó una simulación de tiempo discreto construida en Python para evaluar y comparar el rendimiento de las arquitecturas QKD propuestas para las comunicaciones de robots móviles. El entorno de simulación modela aspectos físicos y operativos clave relevantes para los despliegues de robots móviles en entornos con posible infraestructura limitada.

2.1 Entorno de Simulación

La simulación emplea un entorno de cuadrícula de tiempo discreto, iniciando en 2D y extendiéndose a 3D para evaluar el espacio volumétrico. El entorno incluye Robots (con posición y objetivo definidos), Estaciones QKD fijas (con un radio de cobertura), Drones/Relays móviles (en la Arquitectura 2) y

Obstáculos estáticos que bloquean tanto el movimiento como la línea de visión de los enlaces de comunicación.

2.2 Modelos de Agentes

Los Robots se modelan como agentes móviles con movimiento dirigido hacia un objetivo principal, pero con un componente aleatorio. Los robots no pueden moverse a ubicaciones de obstáculos y mantienen un búfer de claves local con vida útil y usos limitados. Las Estaciones son fuentes QKD fijas que establecen claves directamente con los robots dentro de su radio de cobertura (Arquitectura 1) o de forma indirecta a través de drones. En la Arquitectura 2, los Drones/Relays son agentes móviles cuyo rol es adquirir claves y retransmitirlas activamente a los robots que se encuentran dentro de su radio de retransmisión, extendiendo la cobertura en el espacio.

2.3 Protocolo QKD Simulado (Toy BB84)

Se utiliza un modelo simplificado del protocolo QKD BB84 (bb84_simulate) para simular el establecimiento de claves entre dos partes. El proceso incluye la simulación de la generación de bits y bases y la posible escucha (Eve) mediante la introducción de errores basados en una probabilidad configurable. Una sesión se considera exitosa solo si la clave tamizada resultante tiene la key_length requerida y el QBER estimado está por debajo de un umbral predefinido (ej., 0.15). El QBER se modela para incluir un nivel de ruido base y un componente que aumenta con la distancia euclidiana entre las partes comunicantes en 3D.

2.4 Gestión de Claves y Comunicación

Se utiliza una clase KeyManager para rastrear centralmente todas las sesiones QKD exitosas y las abortadas. Cuando una sesión QKD es exitosa, se registra la clave secreta derivada junto con su paso de adquisición y usos iniciales. El key_buffer de los robots se actualiza en cada paso de tiempo para reflejar la adquisición de nuevas claves (de estaciones o drones) y la expiración/eliminación de claves según su duración o usos agotados. La comunicación segura se simula utilizando cifrado AES. Un robot solo puede enviar un mensaje cifrado con éxito a un objetivo si posee una clave válida y no caducada para esa fuente con usos disponibles. Si tiene éxito, se decrementa el contador de usos de la clave.

2.5 Ejecución de la Simulación y Recopilación de Métricas

La simulación se ejecuta durante un número fijo de steps o pasos de tiempo. En cada paso, los agentes se mueven, se intenta el establecimiento de claves QKD (ya sea directa o por retransmisión), se actualizan los búferes de claves de los robots (adición o expiración) y los robots intentan enviar mensajes cifrados si hay claves válidas disponibles.

Las métricas clave registradas incluyen: recuentos de sesiones QKD exitosas y abortadas, el QBER y la latencia para las sesiones exitosas, la disponibilidad de claves por robot a lo largo del tiempo, y el recuento de mensajes enviados y cifrados con éxito. Los datos se procesan para calcular estadísticas agregadas y evaluar la resiliencia mediante escenarios de fallos simulados.

Una vez que la simulación concluye, los datos recopilados se procesan para calcular métricas agregadas como el QBER promedio, la latencia promedio de establecimiento de claves, la tasa de éxito general de la misión y el porcentaje promedio de disponibilidad de claves por robot y en toda la flota. Se generan estadísticas detalladas (desviación estándar, percentiles) y visualizaciones (mapas de calor, diagramas de caja) para analizar los resultados.

Las simulaciones también incluyen escenarios con fallos temporales simulados de estaciones específicas (Arquitectura 1) o drones (Arquitectura 2) para evaluar la resiliencia de las arquitecturas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se examinó el impacto de la configuración del entorno, el número y características de los agentes, y la simulación de fallos en métricas clave como la disponibilidad de claves, la latencia de establecimiento de claves, el QBER y la tasa de éxito de la misión.

3.1 Resultados en Entorno 2D

La Arquitectura 1 (Estaciones Fijas) con amplio radio (10 unidades) demostró una alta disponibilidad de claves, logrando 43 sesiones QKD exitosas y un 94.00% de disponibilidad promedio de claves para 2 robots. Esta alta disponibilidad se mantuvo incluso al escalar a 6 robots (98.33% promedio), pero se degradó a 0.00% al reducir el radio de la estación (Figura 1 y Figura 2). La Arquitectura 2 (Relays Móviles), en su configuración base, mostró una disponibilidad promedio del 76.50%, mejorando hasta el 90.00% con un mayor número de drones relay. En ambas arquitecturas en 2D, el QBER promedio se mantuvo en 0.000, confirmando el éxito del protocolo simulado. La latencia se mantuvo estable, alrededor de 3 unidades de tiempo.

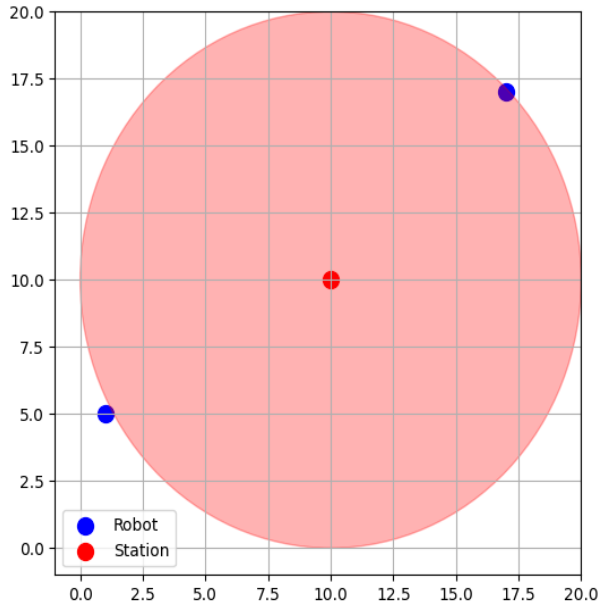


Figura 1: Configuración inicial de la simulación para la Arquitectura 1 (Estaciones Fijas) con 2 robots y 1 estación.

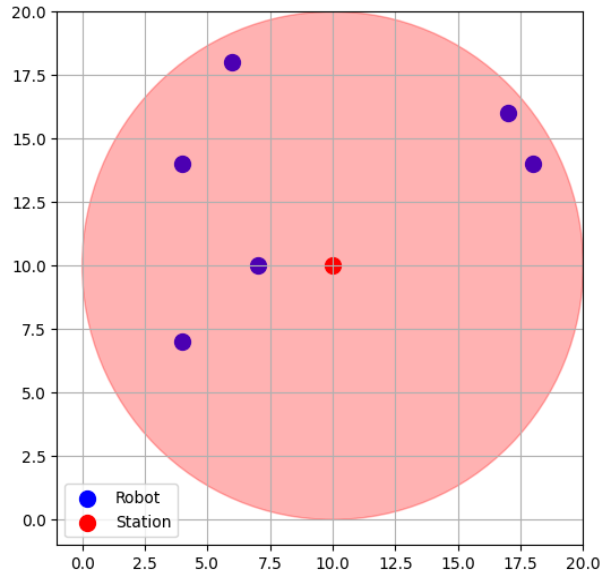


Figura 2: Impacto del número de robots en la disponibilidad de claves en la Arquitectura 1 (Estaciones Fijas) en entorno 2D. Se muestra la disponibilidad de claves a lo largo del tiempo para diferentes números de robots.

3.2 Resultados en Entorno 3D

La transición a un entorno 3D con obstáculos (Figura 3 y Figura 4) presentó mayores desafíos de cobertura, reflejados en un QBER promedio ligeramente superior (0.070-0.098) y un mayor número de sesiones abortadas. La latencia se mantuvo en rangos similares al entorno 2D (2.6-3.4 unidades de tiempo), con distribuciones comparables entre arquitecturas (Figura 8).

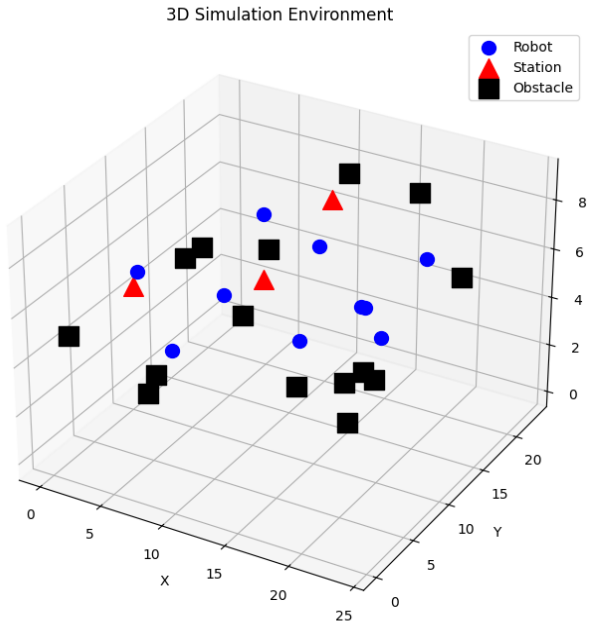


Figura 3: Un ejemplo de la simulación en 3D para la Arquitectura 1 (Estaciones Fijas). Se muestran robots (esferas azules), estaciones QKD (pirámides rojas) y obstáculos (cubos negros) dentro de un entorno tridimensional cuadriculado. Esta visualización ayuda a entender la distribución espacial de los agentes y la infraestructura en el modelo.

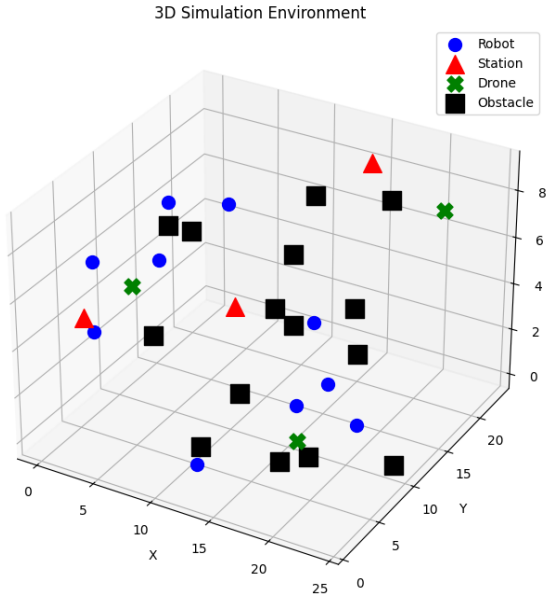


Figura 4: Un ejemplo del entorno de simulación 3D para la Arquitectura 2 (Relays Móviles). La escena incluye robots (esferas azules), estaciones QKD fijas (pirámides rojas), drones relay (cruces verdes) y obstáculos (cubos negros). Esta visualización ilustra cómo los drones operan en el espacio 3D junto con la infraestructura fija y los robots, facilitando la distribución de claves en un entorno más dinámico.

Arquitectura 1 (Estaciones Fijas) en 3D

Al aumentar el número de robots (de 5 a 15) con una infraestructura fija (3 estaciones, radio 8), la disponibilidad promedio de claves por robot disminuyó del 64.20% al 46.93% (Tabla 1), indicando una mayor demanda sobre la cobertura limitada. Una mayor densidad de estaciones fijas resultó ser crucial, ya que el rendimiento mejoró drásticamente de 8.80% de disponibilidad con 1 estación a 78.40% con 5 estaciones (Tabla 2). Del mismo modo, un radio de cobertura más grande (12 unidades) incrementó la disponibilidad hasta 92.80% (Tabla 3). La simulación de fallo temporal demostró vulnerabilidad localizada, resultando en una disponibilidad promedio del 85.50% y una interrupción visible en el mapa de calor (Figura 5).

Arquitectura 2 (Relays Móviles) en 3D

Al variar el número de robots, la disponibilidad promedio mostró una tendencia creciente y variable, alcanzando un máximo de 82.53% con 15 robots (Tabla 4). Un mayor número de drones (de 1 a 5) mejoró la disponibilidad del 65.70% al 71.60% (Tabla 5). Un mayor radio de retransmisión del drone (8 unidades) también aumentó notablemente la disponibilidad hasta el 75.30% (Tabla 6). La simulación de fallo de drone resultó en una disponibilidad promedio general del 63.90%, mostrando una naturaleza más intermitente de la disponibilidad de claves en esta arquitectura (Figura 6).

Impacto del Número de Robots: Evaluamos el rendimiento al variar el número de robots (5, 10, 15) con un número fijo de estaciones (3) y radio (8). Al aumentar el número de robots, la disponibilidad promedio de claves por robot tendió a disminuir. Los resultados clave se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Impacto del Número de Robots en Arquitectura 1 (3D)

# Robots	Disponibilidad Clave Promedio (%)	Sesiones QKD Exitosas	Sesiones Abortadas
5	64.20	34	32
10	51.00	57	47
15	46.93	76	56

Tabla 2: Impacto del Número de Estaciones en Arquitectura 1 (3D)

# Estaciones	Disponibilidad Clave Promedio (%)	Sesiones QKD Exitosas	Sesiones Abortadas
1	8.80	9	5
3	50.10	54	48
5	78.40	87	75

Tabla 3: Impacto del Radio de la Estación en Arquitectura 1 (3D)

Radio Estación	Disponibilidad Clave Promedio (%)	Sesiones QKD Exitosas	Sesiones Abortadas
5	47.70	50	27
8	55.30	61	56
12	92.80	102	90

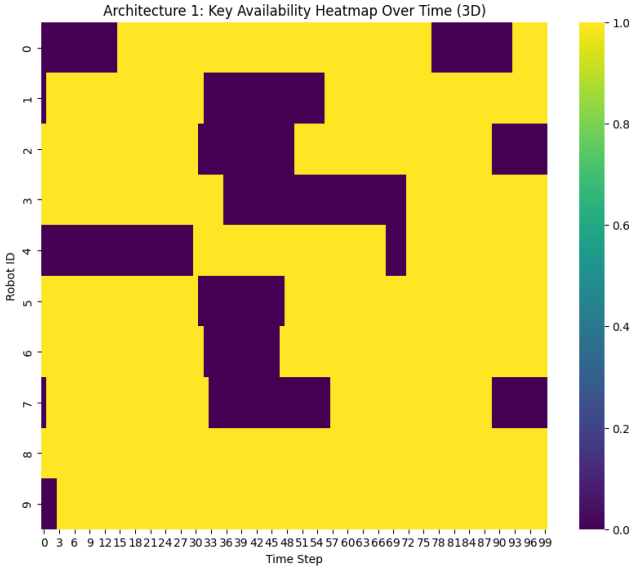


Figura 5: Mapa de calor de la disponibilidad de clave por robot a lo largo del tiempo en la Arquitectura 1 (Estaciones Fijas) durante la simulación de fallo temporal de una estación. El eje horizontal representa los pasos de tiempo, el eje vertical los IDs de los robots, y el color indica si el robot tenía una clave válida disponible (amarillo/verde) o no (púrpura oscuro). Se observa la interrupción en la disponibilidad de claves para algunos robots durante el período de fallo simulado de la estación.

Tabla 4: Impacto del Número de Robots en Arquitectura 2 (3D)

# Robots	Disponibilidad Clave Promedio (%)	Sesiones QKD Exitosas	Sesiones Abortadas
5	36.00	19	22
10	52.20	55	57
15	82.53	134	156

Tabla 5: Impacto del Número de Drones en Arquitectura 2 (3D)

# Drones	Disponibilidad Clave Promedio (%)	Sesiones QKD Exitosas	Sesiones Abortadas
1	65.70	70	50
3	56.80	65	47

5	71.60	82	63

y Tabla 6: Impacto del Radio del Drone en Arquitectura 2 (3D)

Radio Drone	Disponibilidad Clave Promedio (%)	Sesiones QKD Exitosas	Sesiones Abortadas
4	61.50	67	47
6	34.10	36	49
8	75.30	78	80

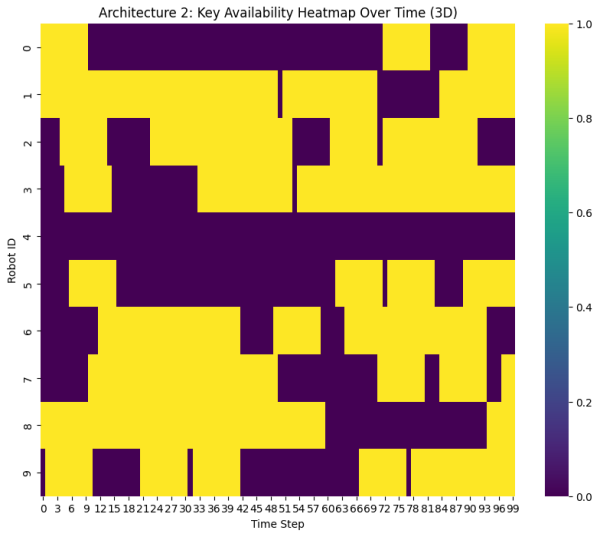


Figura 6: Mapa de calor de disponibilidad de clave por robot a lo largo del tiempo en la Arquitectura 2 (Relays Móviles) simulando un fallo temporal de drone. El eje X son los pasos de tiempo, el eje Y los IDs de los robots, y el color indica la disponibilidad de clave (amarillo/verde: disponible; púrpura oscuro: no disponible). Se observa una disponibilidad más intermitente que en la Arquitectura 1, con posibles interrupciones por el fallo del drone relay, aunque otros relays mantengan la conectividad para algunos robots.

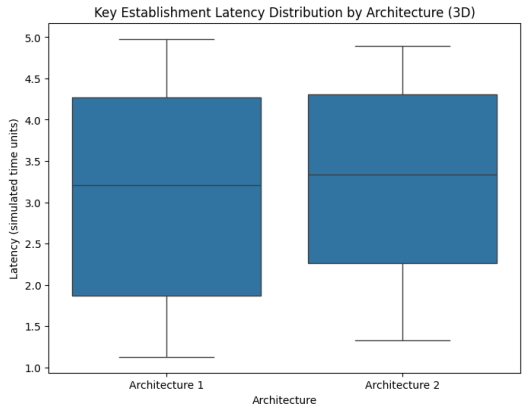


Figura 8: Distribución de la latencia simulada de establecimiento de clave QKD exitosa en Arquitecturas 1 (Estaciones Fijas) y 2 (Relays Móviles) en simulación 3D a gran escala con fallos. El boxplot compara mediana, cuartiles y rango de tiempos para establecer una clave segura entre ambas.

3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN

La Arquitectura 1 (Estaciones Fijas) ofrece una disponibilidad más estable en áreas de cobertura fija. En contraste, la Arquitectura 2 (Relays Móviles) ofrece mayor flexibilidad espacial para cubrir un volumen 3D dinámico, pero con una disponibilidad que tiende a ser más variable e intermitente, como lo confirma una mayor desviación estándar (Figura 7). El éxito de la misión (mensajes cifrados exitosamente) fue del 100% cuando las claves estaban disponibles; la principal limitación fue la falta de disponibilidad de clave válida. La simulación de fallos subrayó que la Arquitectura 2 podría ofrecer mejor resiliencia general si existen rutas alternativas para la distribución de claves.

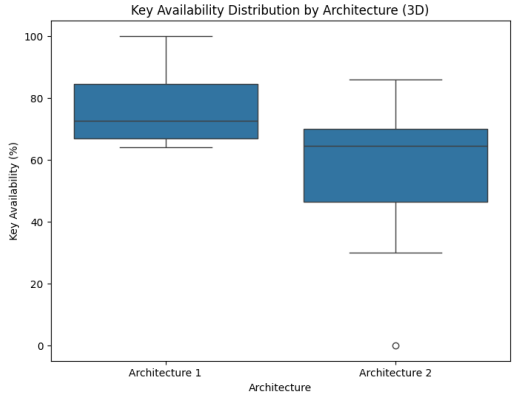


Figura 7: Disponibilidad de clave (% de tiempo con clave válida) por robot en simulaciones 3D a gran escala con fallos, comparando Arquitecturas 1 (Estaciones Fijas) y 2 (Relays Móviles). El boxplot detalla la mediana, cuartiles y rango de desempeño en acceso a claves seguras.

4. CONCLUSIONES

Este estudio de simulación confirma la viabilidad de las arquitecturas de Estación Fija (Hotspot) y Relay Móvil para habilitar comunicaciones seguras mediante Distribución de Clave Cuántica (QKD) en flotas de robots móviles dinámicas y con infraestructura limitada. La efectividad de cada enfoque está fuertemente determinada por el entorno y los parámetros operativos.

La Arquitectura 1 (Estación Fija) demuestra una disponibilidad de claves robusta y predecible en zonas de cobertura fija, adecuada para entornos estructurados, pero sufre una degradación drástica fuera de estas zonas y es vulnerable a fallos localizados sin redundancia. En contraste, la Arquitectura 2 (Relay Móvil) ofrece la flexibilidad necesaria para extender la distribución de claves a entornos dinámicos,

no estructurados o a gran escala, aunque su disponibilidad tiende a ser más variable e intermitente. La extensión a entornos 3D con obstáculos enfatizó la necesidad de considerar la dimensión vertical y la planificación cuidadosa del despliegue para mantener la cobertura.

La latencia de establecimiento de claves fue comparable entre arquitecturas, pero la disponibilidad de claves y la resiliencia variaron significativamente, lo que subraya que la limitación principal para el éxito de la misión fue la falta de clave válida. Un enfoque híbrido (estaciones fijas para cobertura base y relays móviles para zonas remotas o bajo demanda) podría ofrecer el equilibrio óptimo de disponibilidad y resiliencia.

Habilitar la seguridad teóricamente incondicional a través de QKD es crucial para proteger los sistemas robóticos autónomos de misión crítica. Las futuras investigaciones se centrarán en:

- Modelado Avanzado de Enlaces Cuánticos y Entorno 3D: Integrar efectos físicos de FSO y modelos de movimiento más sofisticados.
- Optimización: Desarrollar políticas avanzadas de gestión de claves y algoritmos para optimizar el despliegue de estaciones y relays.
- Evaluación de Arquitecturas Híbridas: Realizar simulaciones dedicadas a la interacción y sinergia entre ambos enfoques.

Este estudio se limita a simulaciones, abriendo líneas de trabajo futuras hacia la validación experimental. En conclusión, este proyecto proporciona una guía crucial sobre los compromisos de diseño para futuras redes robóticas con seguridad cuántica, siendo el primer estudio comparativo de QKD en entornos multi-robot 3D.

4. REFERENCIAS

Dubey, U., Babu, C. P. & Kumar, A. (2024). A review on practical challenges of aerial quantum communication. Quantum Science and Technology, 9(1), 013001.

Escañez-Expósito, D., Martínez-Mateo, J., Villar, L. & Soto, A. (2023). Interactive simulation of quantum key distribution protocols. Telecommunication Systems, 73(3), 523-536.

Gkouliaras, K., Tsimpouris, C., Giannoulis, D., Christidis, K. & Symeonidis, P. (2024). NuQKD: A modular quantum key distribution simulation framework. Advanced Quantum Technologies, 7(1), 2200016.

Weier, H., Schmitt-Manderbach, T., Regner, N., Kurtsiefer, C., & Weinfurter, H. (2006). Free space quantum key distribution: Towards a real life application. Fortschritte der Physik: Progress of Physics, 54(8-10), 840-845.

Xue, Y., Chen, W., Wang, S., Yin, Z., Shi, L., & Han, Z. (2021). Airborne quantum key distribution: a review. Chinese Optics Letters, 19(12), 122702.

Kopeczi-Bocz, G. & Bacsárdi, L. (2025). Simulation of drone-based quantum key distribution systems. OMIKK Repository. Retrieved from https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstreams/62ff7ble-f3fb-4f15-a953-ec29f4f15-a953-ec29f4fba8ff/download

Liu, H.-Y., Chen, Y.-H., Zhu, S.-R., Cao, S.-Y., Zhang, X., Li, Y.-Z. et al. (2021). Optical-relayed entanglement distribution using drones as quantum repeaters. Physical Review Letters, 126(2), 020503.

Sasikumar, S., Khilar, R., Singh, A. & Singh, A. (2022). Modeling and simulation of a novel secure quantum key distribution model for cloud data security. Future Generation Computer Systems, 128, 1-11.

Tian, X.-H., Yang, R., Zhang, J.-N., Yu, H., Zhang, Y., Fan, P. et al. (2023). Drone-based quantum key distribution. arXiv preprint arXiv:2302.14012.

Dervisevic, E., Tankovic, A., Fazel, E., Kompella, R., Fazio, P., Voznak, M., & Mehic, M. (2025). Quantum Key Distribution Networks-Key Management: A Survey. ACM Computing Surveys, 57(10), 1-36.

Jingyi Chen (2025). A Review on Quantum Key Distribution for Wireless Networks: Current Status and Future Prospects. Proceedings of the 3rd International Conference on Mathematical Physics and Computational Simulation

Zhang, (2017). Free-space quantum key distribution over 100 km for space-to-ground and air-to-ground applications. Nature Photonics, 11, 649–653.

Zhao, Y., Loo, T. B. B., Kanesou, D. L. V., Tan, S. K. C., Loke, P. J. R. K., Lee, M. L. W. L. et al. (2020). Scalable fiber-based quantum-key-distribution network with a trusted repeater. Physical Review Applied, 13(1), 01403

Educational Prototype For Electrocardiogram Signal Processing Using ESP32 And LabVIEW

Rivera Méndez Bianca Adamaris*, Morales Dolores Abigail*, Mejía Arellano Daniela*

** Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico S/N-A.P. 247, Santa María Coapan, 75770 Tehuacán, Pue. (e-mail:L21360217@tehuacan.tecnm.mx, L21360212@tehuacan.tecnm.mx , L21360228@tehuacan.tecnm.mx)*

Abstract: The electrocardiogram (ECG) is one of the most widely used physiological signals for both clinical diagnosis and teaching purposes. The main objective of this study is to develop and validate a low-cost educational prototype of a cardiac signal acquisition system that can strengthen hands-on learning, improve the employability of students, and serve as a replicable model. The methodology combined a mixed research approach, including quantitative surveys applied to forty-one students and qualitative interviews with five faculty members, in order to diagnose current deficiencies, measure the impact of the lack of equipment, and evaluate the feasibility of introducing low-cost strategies. In parallel, the design and implementation of the prototype were carried out using ESP32-based microcontrollers, instrumentation amplifiers, surface electrodes, analog filters, and a graphical interface in LabVIEW to acquire and display cardiac signals in real time. The circuit was first simulated in Proteus to validate the filtering stages and then assembled on a protoboard and pre-perforated board for testing. The experimental results indicate that the system effectively captures and amplifies the heart's electrical activity, displaying identifiable P, QRS, and T waves with low noise levels. These findings demonstrate the system's feasibility and technical functionality. Students who interacted with the system expressed increased confidence in their ability to operate biomedical devices and interpret physiological signals. These preliminary outcomes demonstrate that the prototype not only reduces the technological gap in education but also promotes experiential and meaningful learning, offering an accessible and scalable solution to improve biomedical engineering training in Mexico.

Keywords: Biomedical Engineering, Bioinstrumentation, Electrocardiogram, Low-cost Prototype, Practical Training.

1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Biomédica integra los principios de la ingeniería, la biología y la medicina para diseñar soluciones tecnológicas orientadas a la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Dentro de esta disciplina, la bioinstrumentación se considera un área esencial, ya que permite el desarrollo y aplicación de dispositivos capaces de adquirir, procesar y analizar señales fisiológicas (Smith & Jones, 2008). Una de las señales más relevantes es el electrocardiograma (ECG), utilizado ampliamente en la práctica clínica para la detección de arritmias, alteraciones en la conducción y enfermedades cardiovasculares, las cuales representan la principal causa de muerte a nivel mundial (World Health Organization, 2023).

En países en desarrollo, uno de los principales retos en la enseñanza de la bioinstrumentación es la carencia de equipos médicos en los laboratorios universitarios (Brown et al., 1998). Esta situación genera una dependencia casi exclusiva de la formación teórica, lo que limita la adquisición de competencias prácticas como la operación de dispositivos biomédicos y la interpretación de señales fisiológicas. En México, la brecha se acentúa en instituciones públicas con restricciones presupuestarias, donde los estudiantes no siempre tienen acceso a sistemas digitales como los que se emplean en más del 90% de los hospitales del país (Secretaría de Salud, 2008).

Diversos enfoques pedagógicos respaldan la necesidad de aprender mediante la práctica. El aprendizaje significativo (Ausubel, 2002), el constructivismo (Vygotsky, 1978) y la teoría del aprendizaje experiencial (Kolb, 1984) coinciden en que la interacción directa con los equipos refuerza la motivación y la comprensión de los estudiantes. En este sentido, los **prototipos educativos de bajo costo** constituyen una alternativa viable y replicable para la enseñanza de la bioinstrumentación (Dewey, 1938).

El uso de tecnologías de bajo costo en la enseñanza de bioinstrumentación ha demostrado resultados positivos. Rodríguez et al. (2019) desarrollaron un prototipo basado en Arduino para la adquisición de ECG, logrando reducir costos en más de un 70% en comparación con equipos comerciales. De manera similar, López y Martínez (2021) reportaron un sistema implementado en una universidad mexicana que permitió a los estudiantes realizar prácticas de bioseñales sin necesidad de equipos hospitalarios, mejorando significativamente su desempeño académico.

De forma complementaria, investigaciones recientes han ampliado el panorama de análisis y adquisición de señales electrocardiográficas mediante modelos basados en aprendizaje profundo y sincronización cardíaca, así como sistemas IoT de monitoreo en tiempo real con microcontroladores ESP32 (Li et al., 2023; Gao & Cross,

2021; Singh, Sharma, & Kumar, 2021; Wang et al., 2024). Estas contribuciones resaltan la relevancia del uso de hardware abierto junto con herramientas profesionales como LabVIEW, al ofrecer un entorno flexible, accesible y educativo para el procesamiento de señales biomédicas.

METODOLOGÍA

El estudio se diseñó bajo un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) y de tipo experimental. La población estuvo conformada por estudiantes de la carrera de Ingeniería Biomédica del Instituto Tecnológico de Tehuacán. El proceso metodológico se desarrolló en las etapas que se muestran en el diagrama de la Fig. 1

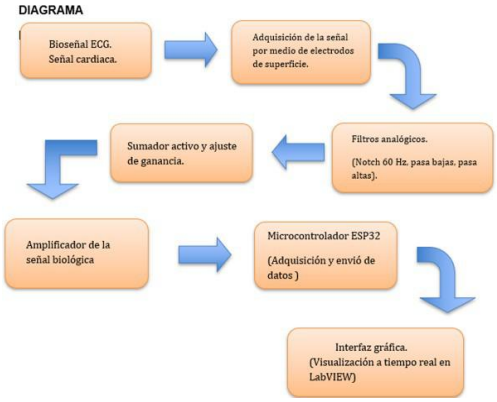


Fig 1. Diagrama de bloques que muestra el desarrollo del procesamiento de la señal ECG.

1.1 Etapas del sistema ECG

1. Señal cardíaca (ECG): Se obtiene de la actividad eléctrica del corazón medida en la superficie de la piel; contiene las ondas P, QRS y T, esenciales para análisis clínico y educativo.
2. Electrodos de superficie: Electrodos de Ag/AgCl colocados en posiciones estándar captan la diferencia de potencial del corazón y la transmiten al circuito.
3. Amplificador de instrumentación: Incrementa la señal del orden de milivoltios a voltios (ganancia ≈500), reduce ruido y rechaza interferencias en modo común.
4. Filtros analógicos:Se aplican en cascada:
   Notch (60 Hz) elimina ruido de red eléctrica, pasa-altas (≈1 Hz) elimina bajas frecuencias y DC.
   Pasa-bajas (≈150 Hz) suprime altas frecuencias.Sumador activo y ajuste de ganancia: Centra y calibra la señal con un potenciómetro para que se adapte al rango del ADC del ESP32 (0–3.3 V).
5. Microcontrolador ESP32: Digitaliza la señal con su ADC de 12 bits (500–1000 Hz) y transmite los datos vía serial, Wi-Fi o Bluetooth.
6. Interfaz en LabVIEW: Recibe los datos del ESP32, los grafica en tiempo real, permite aplicar filtros digitales y almacenar registros, facilitando el análisis didáctico del ECG.

1.2 Diseño y simulación del circuito.

Se diseñó el circuito de adquisición de señal ECG empleando el software Proteus, lo que permitió validar el funcionamiento teórico de los componentes antes del montaje físico. Se realizaron simulaciones para validar las etapas de amplificación, filtrado (notch, pasa bajas, pasa altas), acoplamiento y visualización digital de la señal ECG.

1.3 Acoplamiento y amplificación.

Para el acoplamiento se utilizaron amplificadores de instrumentación ya que nos brinda una impedancia de entrada infinita produciéndose el efecto del acople de impedancias y por otro lado tiene un amplificador diferencial el cual amplifica la diferencia de la señal proveniente de los electrodos 1 y 2. El amplificador de instrumentación se compone de tres amplificadores operacionales y tiene la siguiente estructura que se muestra en la Fig.2.

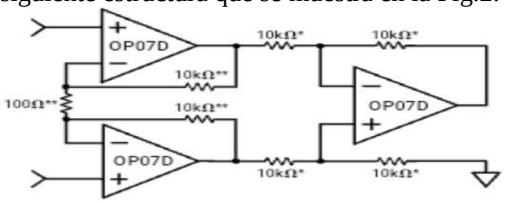


Fig 2. Diagrama del amplificador de instrumentación AD620, las especificaciones OP07 para el desplazamiento de voltaje de entrada y ruido se han multiplicado por 2; Se debe a que un amplificador de entrada de tipo tres amplificadores operacionales tienen dos amplificadores operacionales en sus estradas, ambos contribuyendo al error de entrada general (5).

Como las amplitudes de la señal eléctrica del corazón van desde 1 milivoltio a 5 milivoltios la ganancia de nuestro amplificador debe ser alta de 500. El amplificador mostró en la simulación que tiene una ganancia de 500, se aplicó un milivoltio a la entrada y se obtuvo a la salida 1 voltio como se muestra en la Fig. 3.

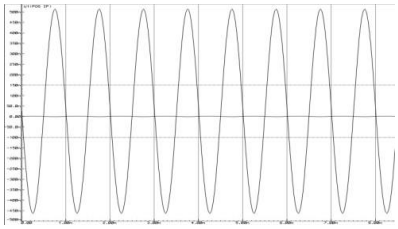


Fig 3. Resultado de la simulación de ganancia.

2. FILTRADO.

2.1 Filtro Notch 60 Hz.

El circuito fue expuesto a ruido ambiental que proviene de lámparas fluorescentes y otros dispositivos electrónicos que

emiten ruido a través de ondas de 60Hz que se muestra en la Fig.4, por ello se hizo un filtro de ranura fijo en 60 Hz para disminuir la amplitud de esta frecuencia.

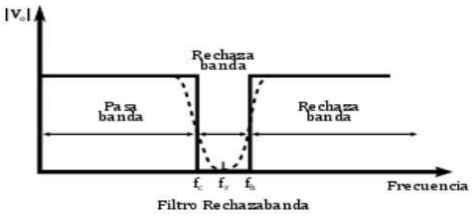


Fig 4. Respuesta en frecuencia filtro notch 60hz (7)

2.2 Filtro Paso Bajas.

El siguiente módulo se divide en dos filtros uno pasa-bajo y otro pasa-alto (compensador de Offset), los cuales trabajan en conjunto para formar un filtro pasa-banda en el cual se maneja un determinado rango de frecuencia para el ECG, los rangos de frecuencia de un ECG trabajan desde 1.8 Hz hasta 150 Hz. En la Fig. 5 se presenta el filtro paso-bajas.

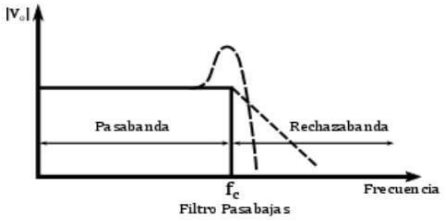


Fig 5. Respuesta en frecuencia de un filtro pasa bajas.

2.3 Filtro Paso Altas.

Los altavoces de diafragmas pequeños como los tweeters, unidades de compresión, entre otros, están diseñados para reproducir frecuencias altas, para este caso hicimos uso de un filtro paso altas que se muestra en la Fig.6.

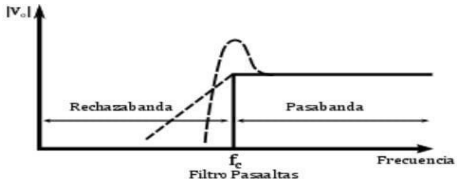


Fig 6. Respuesta en frecuencia de filtro pasa altas (7).

3. SUMA DE SEÑALES BIO-ELÉCTRICAS.

La suma de las señales se da en la última etapa, adecuado las señales para que tengan la misma ganancia y amplificando la señal para obtener una ganancia más aceptable, con un potenciómetro, se muestra el diagrama en la Fig. 7.

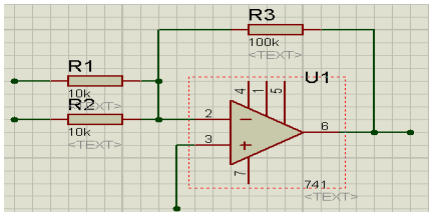


Fig 7. Diagrama sumador en Proteus.

3.1 Programación del microcontrolador.

Se utilizó la tarjeta ESP32 para la adquisición de datos. El código implementado contempló la lectura de la señal, el preprocesamiento básico y el envío de datos vía comunicación serial hacia la computadora.
El montaje final del sistema ECG propuesto consistió en la integración de todas las etapas previamente simuladas y calculadas: amplificación, filtrado (notch, pasa bajas, pasa altas), acoplamiento y visualización digital, utilizando componentes electrónicos disponibles comercialmente y conectándose al microcontrolador ESP32, que envía la señal al software LabVIEW.

3.2 Desarrollo de la interfaz gráfica.

En la Fig.8 se muestra el diseño de la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW.

Fig.8. Interfaz en LabVIEW

3.3 Construcción del prototipo.

Con base en los resultados de simulación, se procedió al ensamblaje físico del prototipo. Este incluyó el circuito de acondicionamiento de señal, la tarjeta ESP32 y el enlace con la plataforma LabVIEW para la visualización.
La última etapa fue un sumador activo que permitió adecuar la señal final al rango del ADC del ESP32, utilizando un potenciómetro para ajustar el nivel de salida. Esto puede verse en la Fig. 9 y Fig.10.

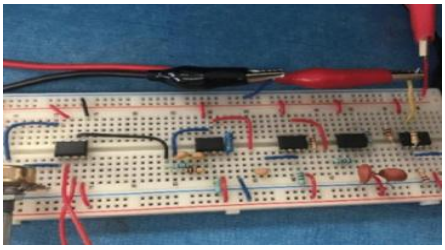


Fig.9. Ensamble del circuito sumador de señales.

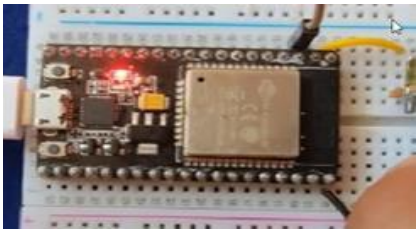


Fig.10. Ensamble del circuito sumador de señales.

Además, con ayuda de dibujo asistido por computadora se diseñó la carcasa para el prototipo ya soldado en pbc como se muestra en la Fig 11.

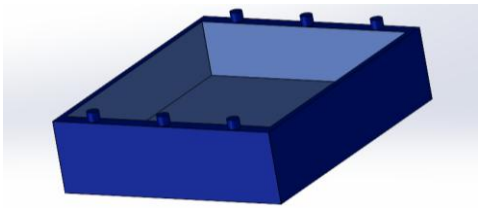


Figura 11. Diseño en Solidworks de la carcasa en donde estará el prototipo.

El prototipo fue validado experimentalmente mediante la adquisición de señales ECG simuladas y reales, con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento de las etapas de amplificación, filtrado y visualización. Para ello, se compararon las formas de onda obtenidas con un sistema comercial de referencia, evaluando la fidelidad de la señal y la respuesta del sistema en condiciones controladas. Los resultados confirmaron la precisión y estabilidad del prototipo propuesto para fines educativos como se muestra en la figura 11.1

Figura 11.1 Señal ECG generada en un electrocardiógrafo comercial Mindray uMEC 10.

4. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El sistema completo permitió visualizar en tiempo real la señal ECG en la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW a través del ESP32. Se observaron variaciones de amplitud y respuesta según los ajustes del potenciómetro y los componentes que se muestra en la Fig. 13.

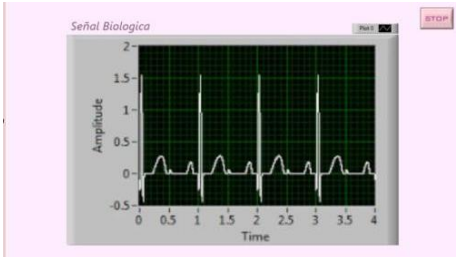


Fig.13. Visualización de señal ECG en LabVIEW reproduciendo fielmente las ondas P, QRS y T del corazón.

Los resultados mostraron que la señal visualizada fue clara y libre de ruido, gracias a la combinación de filtros, el comportamiento del circuito fue estable y seguro para prácticas educativas además los valores utilizados de resistencias y capacitores funcionaron correctamente con las tolerancias comerciales disponibles.

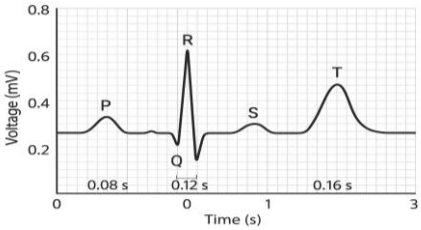


Figura 14. Señal electrocardiográfica obtenida en la interfaz LabVIEW, mostrando la morfología típica de las ondas P, QRS y T. Las duraciones observadas corresponden a los valores esperados para un ECG estándar (P: 0.08 s, QRS: 0.12 s, T: 0.16 s aproximadamente), confirmando la correcta adquisición y procesamiento de la señal por el sistema desarrollado.

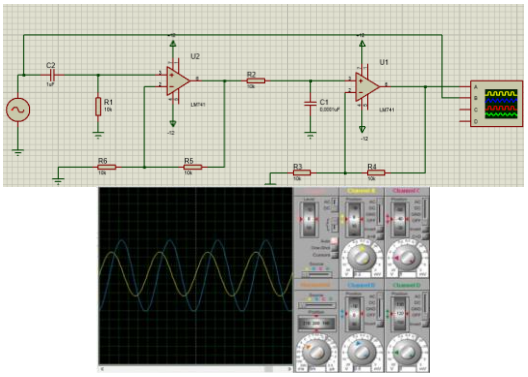


Figura 14 y 15. Respuesta del circuito de acondicionamiento de señal ante una frecuencia de entrada de 40 Hz. La señal celeste corresponde a la entrada del generador de funciones y la amarilla a la salida del circuito.

5. CONCLUSIONES

El prototipo diseñado demostró su funcionalidad al adquirir señales fisiológicas de ECG, procesarlas mediante filtros analógicos y mostrarlas en tiempo real en una interfaz gráfica. Este desempeño confirma la viabilidad técnica del sistema para fines educativos. Su construcción requirió un costo significativamente inferior al de un equipo médico comercial (menos de $1,200 MXN), lo que lo convierte en una alternativa accesible y adecuada para instituciones con recursos limitados. El sistema cumple con los criterios de seguridad y simplicidad de uso necesarios en entornos académicos, al no requerir infraestructura especializada y poder integrarse en prácticas de laboratorio convencionales.

Los resultados obtenidos constituyen una validación inicial, lo que abre la posibilidad de mejorar y ampliar el diseño hacia versiones más robustas que incluyan almacenamiento de datos, comunicación inalámbrica y aplicaciones en otras señales biomédicas. En conclusión, el prototipo desarrollado no pretende sustituir equipos médicos comerciales, sino servir como una herramienta didáctica de bajo costo, replicable y escalable, que fortalezca la enseñanza práctica en Ingeniería Biomédica y promueva una cultura de innovación educativa en instituciones con recursos limitados.

REFERENCIAS

Ausubel, D.P. (2002). Psicología educativa: Un punto de vista cognoscitivo (2ª ed.). Trillas, México.
Brown, F., Harris, M.G. and Other, A.N. (1998). Biomedical

education and the challenges of instrumentation in developing countries. In Harris,
M.G. (ed.), Advances in Biomedical Engineering Education, pp. 101–115. Springer, New York.
Dewey, J. (1938). Experience and Education. Macmillan, New York.
Espressif Systems (2020). ESP32 Technical Reference Manual. Espressif Systems. Available at: https://www.espressif.com (Accessed: 22 September 2025).
López, M. and Martínez, J. (2021). Uso de prototipos de bioseñales de bajo costo en universidades públicas mexicanas. Revista de Ingeniería Biomédica, 15(2), pp. 45–53.
Mills, A., Carter, P. and Evans, R. (2017). Implementation of Raspberry Pi in biomedical signal acquisition for teaching environments. International Journal of Biomedical Engineering Education, 9(1), pp. 23–31.
National Instruments (2023). LabVIEW User Manual. National Instruments. Available at: https://www.ni.com (Accessed: 22 September 2025).
Rodríguez, L., Hernández, P. and Torres, F. (2019). Diseño de un prototipo educativo de ECG con Arduino para prácticas de laboratorio. Revista Latinoamericana de Ingeniería Biomédica, 11(3), pp. 67–74.
Secretaría de Salud (2008). NOM-137-SSA1- 2008, Especificaciones técnicas para equipos electromédicos. Diario Oficial de la Federación, México.
Singh, R. and Gupta, A. (2020). Low-cost ECG acquisition system using ESP32 and Matlab integration for biomedical education. Journal of Medical Engineering and Technology, 44(5), pp. 289–298.
Smith, S.E. and Jones, L.Q. (2008). Biomedical instrumentation and its role in engineering education. Journal of Biomedical Engineering Education, 12(3), pp. 145–158.
Vygotsky, L.S. (1978). Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. Harvard University Press, Cambridge, MA.
World Health Organization (2023). Cardiovascular diseases (CVDs). World Health Organization. Available at: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds) (Accessed: 22 September 2025).
Analog Devices. (s. f.). AD620 datasheet. AllDatasheet. Recuperado de https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48090/AD/AD620.html
Electronics Tutorials. (s. f.). Band Stop Filter and Notch Filter Design Tutorial. Recuperado de https://www.electronics-tutorials.ws/filter/band- stop-filter.html
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica. (2021). Práctica 2. Laboratorio de Instrumentación II: Filtros activos II (filtro pasa-altas) [PDF]. https://www.fie.umich.mx/lab-electronica/wp-content/uploads/sites/7/2021/10/Practica2- LINSTII.pdf .
Li, Y., Zhang, J., & Wang, X. (2023). Deep learning-based ECG signal analysis: Recent progress and challenges. Mathematical Biosciences and Engineering, 20(4), 6245–6261.
Gao, P., & Cross, M. (2021). Synchronization transitions in cardiac oscillatory systems. Physical Review E, 103(4), 042404.
Singh, R., Sharma, N., & Kumar, A. (2021). IoT-based real-time ECG monitoring using ESP32 and cloud integration. Sensors, 21(15), 5186.
Wang, J., Zhang, H., Chen, L., & Li, P. (2024). Wearable ECG Device and Machine Learning for Heart Monitoring. Sensors, 24(13), 4201

PÓSTER

CIENTÍFICO

Caracterización De Microplásticos A Partir De Caucho Degradado Para Su Mitigación En Un Ciclón Tipo Stairmand.

Cecilia Ortiz Alvarez **, Esperanza Rodríguez Morales **, Ana Laura Martínez Hernández **, Yadira Guadalupe Maldonado *
**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Querétaro.
* Centro Nacional de Metrología (CENAM).

Resumen

Con la finalidad de evaluar si los microplásticos (MPs) presentes en el aire pueden ser separados mediante un ciclón tipo stairmand de acuerdo a la literatura, se generan MPs de caucho mediante trituración, evaluando características físicas mediante microscopía óptica. La mayor eficiencia de microplásticos generados fue de 46% con respecto a las partículas más pequeñas (<150 µm), la cual se obtuvo empleando 5 ciclos de 5 minutos de trituración. Las morfologías predominantes en tamaños de partícula entre 300 y 150 µm fueron aproximadamente de tipo esfera y conforme disminuía el tamaño se presentaban más irregulares, además de presentar una densidad de 1.71 gr/ml.

Introducción

La contaminación por microplásticos en la actualidad representa una amenaza global, (Castañeta, G. et. al. 2020), ya que estudios han revelado su presencia en agua, suelo y aire y se ha determinado que deteriora la calidad en los ecosistemas, provocando daños físicos y mortalidad a los animales, además, estos materiales tienen la capacidad de adsorber contaminantes orgánicos acumulándolos y afectando la salud humana, (León Pulido, J. et. al. 2024). Uno de los contaminantes que más es inhalado a causa del polvo urbano es el caucho que proviene a causa del desgaste de neumáticos, (Navarro Espinoza et. al., 2023), debido a ello este material es considerado en la presente investigación.

Es por ello la importancia de desarrollar y evaluar tecnologías y métodos que permitan la mitigación de microplásticos. Los separadores ciclónicos son equipos que se emplean en la separación de material particulado, por lo que pueden ser empleados como equipos pre-limpiadores que ayudarán a aumentar la calidad del aire, (Bahamondes Santos, J., 2008).

Montijo Valenzuela en 2021 mediante la simulación numérica de un ciclón obtuvo una eficiencia de separación del 79.40% con partículas de entre 5 a 20 µm. En el año 2023 Solórzano Colorado realizó la separación de partículas mayores a 10 µm mediante un ciclón, obteniendo una eficiencia del 88.28%.

Metodología

- **Etapa 1**. Recolección de muestra de caucho en ambientes reales. Se selecciona un tapete automotriz marca Honda® 2008, que presenta un envejecimiento natural. El cual esta fabricado con caucho estireno butadieno (SBR por sus siglas en inglés).
- **Etapa 2.** Medición de la densidad del caucho SBR mediante picnometría.
- **Etapa 3**. Trituración de caucho para generación de microplásticos mediante un molino de cuchillas de acero inoxidable de 18,000 rpm. Empleando 5 ciclos de 5 minutos.
- **Etapa 4**. Clasificación del tamaño de los microplásticos generados, mediante un proceso de tamizado utilizando un arreglo de mallas número 35,50, 100 y fondos de acero inoxidable.
- **Etapa 5**. Caracterización de tamaño y morfología mediante un proceso de filtrado a vacío para su posterior análisis mediante microscopía óptica con ayuda del software AmScope e Image J para el análisis de las imágenes.

Resultados

Mediante picnometría se realizó el calculo de la densidad del material de caucho SBR muestreado, teniendo como resultado una densidad de **1.71gr/ml.**

Mediante la trituración, empleando 5 ciclos de 5 minutos se logró una eficiencia de molienda de 46% respecto a partículas < 150 µm. En la Figura 2 se muestran las partículas de microplásticos obtenidas.

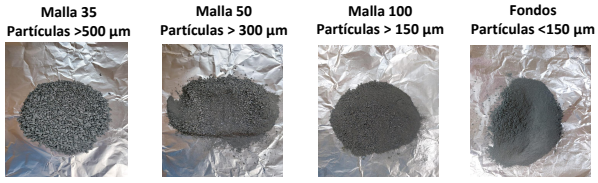


***Figura 1**. Tamaños obtenidos de microplásticos de SBR mediante trituración.*

De cada malla segmentada se tomó una muestra de 5 microgramos para realizar el proceso de filtrado a vacío empleando filtros de membrana de nitrocelulosa de 0.45 µm y un matraz de filtración.

En los filtros con partículas de malla 50 se obtuvieron tamaños desde **435 µm a 485 µm** con una morfología muy similar a una esfera. En los filtros con partículas de los fondos de tamizado (<150 µm), el rango de tamaño se encuentra entre **42 µm a 72 µm** con morfologías más irregulares.

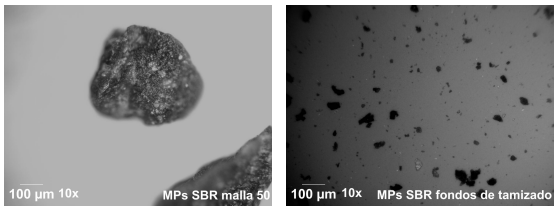


***Figura 2**. Imágenes de microplásticos de SBR obtenidas mediante microscopía óptica.*

En la tabla 1 se presenta un resumen de la información recabada en la literatura sobre características físicas de materiales empleados en separadores ciclónicos y la eficiencia obtenida.

***Tabla 1.** Resumen de eficiencias y características físicas de material particulado reportado en literatura.*

Tamaño de partícula reportada en literatura (µm)	Densidad de material reportada en literatura ($^{gr}/_{cm^3}$)	Eficiencia de separación reportada en literatura	Referencia
5-20	1.5	79.40%	Montijo Valenzuela, 2021
>10	5.24	88.28%	Solórzano Colorado, 2023
1-250	2.248	76%	Rubio López et al., 2024
1-10	1.74	88%	Gutiérrez et. al., 2024

Teniendo entonces durante la experimentación una densidad de material SBR de 1.71 gr/cm^3 y tamaños de partícula de hasta 42 µm y comparando con los datos reportados en la tabla 1, los MPs de SBR cumplen con características que pueden permitir su mitigación mediante un ciclón tipo Stairmand.

En la figura 3 se presenta una imagen del ciclón tipo stairmand que será considerado en la siguiente etapa de la investigación que conlleva las pruebas de separación de MPs en aire.

***Figura 3** Ciclón tipo stairmand.*

Conclusiones

La separación de microplásticos presentes en el aire puede llevarse a cabo mediante un separador ciclónico, ya que de acuerdo a las referencias citadas, las características físicas que fueron analizadas en los MPs generados pueden permitir el proceso de separación.

De acuerdo a Echeverri Londoño 2006, la diferencia de densidades entre el medio de separación y el material es importante lograr una alta eficiencia de separación mediante un ciclón. Por lo que la diferencia de densidades entre el aire y el SBR pueden permitir una eficiente separación.

El estado envejecido del caucho permitió que el proceso de trituración obtuviera un tamaño de partícula < 150 µm ya que su degradación natural permitió una ruptura más rápida del material.

Agradecemos al programa Nuevos talentos científicos y tecnológicos ITQ-Concyteq por el apoyo para realizar la presente investigación.

Referencias

León-Pulido, J., Bedoya Barrera, S., Crissien Castillo, B. F., Santillán Corrales, L., Lacava, J. E., De la Torre Picho, G., Dioses Salinas, D., Schmaedke, A., & Denaro, M. A. (2024). *Microplásticos: identificación de pequeñas partículas con grandes impactos en las playas arenosas de Lima, Buenos Aires y Cartagena.* Universidad Ean. ISBN: 9789587567076

Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F., & Manzano, , Carlos A. (2020). MICROPLASTICS: A CONTAMINANT THAT GROWS IN ALL ENVIRONMENTAL AREAS, ITS CHARACTERISTICS AND POSSIBLE RISKS TO PUBLIC HEALTH FROM EXPOSURE. *Revista Boliviana de Química*, *37*(3). https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.3.4

Montijo-Valenzuela, E. E. (2021). Diseño y validación de un ciclón stairmand destinado al filtrado parcial de material particulado. *Revista docentes 2.0*, *11*(1), 80–88. https://doi.org/10.37843/rted.v11i1.196

Navarro-Espinoza, S., Silva-Campa, E., Acosta-Elías, M., Grijalva-Noriega, F., Navarro-Espinoza, S., Silva-Campa, E., Acosta-Elías, M., & Grijalva-Noriega, F. (2023). Micro(nano)plásticos en el medio ambiente: una descripción de los efectos potenciales a la salud humana. *Epistemus (sonora)*, *17*(35), 68–74. https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i35.311

Solórzano Colorado, D. A. (2023). *Diseño conceptual de un colector de material particulado para mejorar la calidad del aire en la empresa Metalgas S. A*. Universidad Tecnológica de Pereira.

OPTIMIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE FOTOCATALIZADORES DE ÓXIDO DE ZINC PARA LA DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO

Martínez Sánchez Estefanía*, Cruz Santiago Lorenzo Antonio*, Portales Martínez Benjamín**
*Tecnológico Nacional de México / TES de Cuautitlán Izcalli, Av. Nopaltepec s/n Fracción la Coyotera del Ejido San Antonio Cuamatla, Cuautitlán Izcalli, 54748, Estado de México
**Instituto Politécnico Nacional, Laboratorio Nacional de Conversión y Almacenamiento de Energía, CICATA Legaria, Col. Irrigación, CDMX, 11500, México
Correo electrónico institucional: 213142091@cuautitlan.tecnm.mx

RESUMEN

En el presente estudio se analizaron tres metodologías de síntesis para la obtención de fotocatalizadores de óxido de zinc (ZnO), específicamente orientadas a su aplicación en procesos de degradación de azul de metileno (AM), un contaminante orgánico ampliamente utilizado como modelo en ensayos de fotocatálisis. Las rutas seleccionadas para la síntesis fueron: ZAC (utilizando ácido cítrico), ZU (empleando urea), y ZACU (combinando ambos precursores). El objetivo principal de la investigación consistió en establecer una correlación técnica entre las rutas de síntesis y la eficiencia fotocatalítica de los materiales obtenidos. Los fotocatalizadores fueron empleados en un reactor tipo batch, donde se evaluó su capacidad para degradar AM bajo irradiación UV-C, durante un periodo de 120 minutos. Los fotocatalizadores ZAC y ZACU alcanzaron tasas de degradación de ≈82.72%, y por otra parte, el material ZU, demostró ser una alternativa viable y competitiva, al alcanzar una eficiencia de degradación de ≈82.39%.

INTRODUCCIÓN

La presencia de colorantes azoicos como el azul de metileno en aguas residuales industriales constituye una preocupación ambiental significativa debido a su alta estabilidad química, persistencia y potencial toxicidad tanto para organismos acuáticos como para la salud humana. Estos compuestos no solo alteran las características fisicoquímicas del agua, sino que también dificultan los procesos biológicos convencionales de tratamiento, lo que exige el desarrollo de tecnologías avanzadas para su remoción eficiente. Entre las alternativas emergentes, la fotocatálisis heterogénea ha demostrado ser altamente eficaz. Este proceso se basa en la utilización de semiconductores, como el óxido de zinc (ZnO), capaces de absorber radiación (visible o ultravioleta) y generar especies reactivas de oxígeno, tales como los radicales hidroxilos (•OH), que atacan y degradan las moléculas contaminantes hasta compuestos menos dañinos o incluso su completa mineralización. El presente estudio aborda la síntesis controlada de ZnO, evaluando el papel de diferentes agentes: ácido cítrico (AC) y urea (U). Se comparan las tres mejores síntesis (ZAC, ZU y ZACU) con el objetivo de identificar la vía más eficiente para la degradación del azul de metileno, estableciendo así criterios para la optimización de materiales fotocatalíticos en aplicaciones medioambientales avanzadas.

METODOLOGÍA

Para la obtención de los materiales, se emplearon tres enfoques: la vía sol-gel con ácido cítrico (ZAC), la precipitación controlada con urea (ZU) y una combinación de ambos agentes (ZACU). Cada método implica la disolución completa del precursor ($Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$) en el agente correspondiente, seguido de procesos de secado controlado y calcinación a 400 °C, lo que favorece la formación de ZnO. El tratamiento térmico es fundamental para eliminar residuos orgánicos y asegurar la cristalinidad del óxido.

La evaluación de la actividad fotocatalítica se realizó en un reactor batch de vidrio con capacidad de dos litros, diseñado para garantizar la homogeneidad de la mezcla y la exposición uniforme a radiación UV-C (λ = 258 nm). La solución empleada consistió en 30 µM de AM, a la que se añadió el fotocatalizador en concentración de 0.4 g/L. Las condiciones de agitación y temperatura se mantuvieron constantes para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

Antes de la irradiación, se efectuó una etapa de equilibrio en oscuridad durante 30 minutos, permitiendo la adsorción inicial del AM sobre la superficie del catalizador. Posteriormente, se aplicó radiación UV-C durante 120 minutos, con muestreo periódico cada 30 minutos. Las muestras extraídas se analizaron mediante espectrofotometría UV-Vis.

RESULTADOS

El estudio de la actividad fotocatalítica demostró que las tres rutas optimizadas alcanzaron niveles de desempeño prácticamente equivalentes, en contraste con la hipótesis inicial que postulaba al agente quelante como el principal factor diferenciador.

Tabla 1. Tasas de degradación de los fotocatalizadores sobre AM

Catalizador	Agente quelante	% Degradación (120 min)
ZAC	Ácido Cítrico (AC)	82.7219
ZU	Urea (U)	82.3898
ZACU	AC+U	82.7063

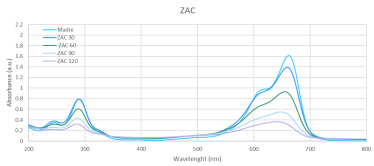


Fig. A. Espectros UV-Vis del AM degradado por ZAC

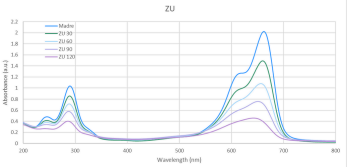


Fig. B. Espectros UV-Vis del AM degradado por ZU

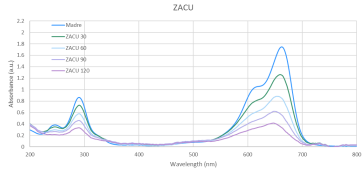


Fig. C. Espectros UV-Vis del AM degradado por ZACU

La diferencia inferior al 0.4% observada entre los tres catalizadores se considera insignificante desde el punto de vista técnico. Se infiere que la optimización de los parámetros de síntesis, tales como la temperatura y la concentración, ejerció una influencia predominante en comparación con el efecto marginal del agente quelante. En consecuencia, tanto el ácido cítrico como la urea proporcionan un control adecuado sobre la nucleación, permitiendo alcanzar elevados niveles de actividad fotocatalítica; por lo tanto, las variaciones entre estos agentes no repercuten de manera significativa en la eficiencia global del proceso.

CONCLUSIONES

- Las tres metodologías de síntesis optimizadas permitieron obtener fotocatalizadores de ZnO con alta eficiencia fotocatalítica (≥82.3%), mostrando valores estadísticamente equivalentes.
- El fotocatalizador ZAC alcanzó una eficiencia máxima de 82.72%, diferenciándose ligeramente de ZACU y ZU, aunque todos presentaron resultados satisfactorios.
- La influencia de los agentes asistentes (AC o urea) fue mínima, evidenciada por la escasa variación en la eficiencia, indicando que su elección no es un parámetro crítico.
- Para entender la convergencia en el desempeño fotocatalítico, se recomienda realizar estudios de caracterización estructural detallados que permitan identificar posibles diferencias morfológicas o cristalinas no detectadas en los valores de eficiencia.

REFERENCIAS

1. Arya, G., Sharma, N., Ahmed, J., Gupta, N., Kumar, A., Chandra, R., & Nimesh, S. (2017). Degradation of anthropogenic pollutant and organic dyes by biosynthesized silver nano-catalyst from Cicer arietinum leaves. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 174, 90–96.
2. Shim, Y. J., et al. (2019). Zinc oxide nanoparticles synthesized by Suaeda japonica Makino and their photocatalytic degradation of methylene blue. Optik, 182, 1015–1020.
3. Montiel, E., Vergara, J., & Torres, C. (2018). Degradación de colorantes en aguas residuales mediante oxidación. Inventio, 13(31).

Estudio Teórico Del 1-Butil-3-Metilimidazolio Funcionalizado Con Aminoácidos Para Captura De CO_2

Oswaldo Artury Gutiérrez Gámez*, Hugo Alberto Velasco Ocejo*, Ana Cristina Ramírez Gallardo, Isidoro García Cruz**, Leonor Angelica Guerrero Zuñiga***, Diana Lucía Campa Guevara*****

*División de Ciencias Exactas, Instituto de Estudios Superiores de Tamaulipas, IEST-Anáhuac, Av. Dr. Burton E. Grossman 501 Pte. Col. Tampico-Altamira Sector 1 C.P. 89605, Altamira, Tam., México.
**Gerencia de Refinación de Hidrocarburos, Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152 Col. San Bartolo Atepehuacán, Delegación Gustavo A. Madero, Cuidad de México, 07730, México.
***Gerencia de Transformación de Biomasa, Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152 Col. San Bartolo Atepehuacán, Delegación Gustavo A. Madero, Cuidad de México, 07730, México
****Departamento de Ciencias Básicas, Tecnológico Nacional de México/I.T de Cd. Madero, Av. Primero de Mayo 1610, Col. Los Mangos, C.P. 89460 Cd. Madero, Tamps.

INTRODUCCIÓN

Las grandes emisiones de dióxido de carbono, CO_2, a la atmósfera, producto de las actividades industriales, resultan en una creciente preocupación a nivel mundial debido a su papel como uno de los principales gases de efecto invernadero[1] Los líquidos iónicos, LIs, son una nueva clase de sales orgánicas formadas por iones que son líquidas a temperaturas menores a los 100°C y que se caracterizan por tener un amplio número de propiedades fisicoquímicas únicas. [2-3]. Los LIs son solventes prometedores para la captación de CO_2 ya que exhiben una fuerte interacción con las moléculas de CO_2 resultado del remplazo de uno de sus componentes ionicos por grupos funcionales contenidos de grupos amino.[4] Una de las propuestas más prometedoras, hasta el momento, es la inclusión de aminoácidos, AAs, como anión en el LI.[5] En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos del estudio teórico de las interacciones empleando métodos semi-empírico y de Teoría de Funcionales de la Densidad, TFD, de una serie de LIs derivados de imidazolio funcionalizados con los AAs: Glutamina, Lisina, Histidina y Arginina cuyo uso ha sido estudiado experimentalmente en nuestro grupo de trabajo [6]

METODOLOGÍA

En este trabajo, se optimizó el sistema líquido iónico (LI) y el sistema LI-CO_2 aplicando diferentes niveles de teoría siguiendo la metodología que se presenta en el siguiente esquema:

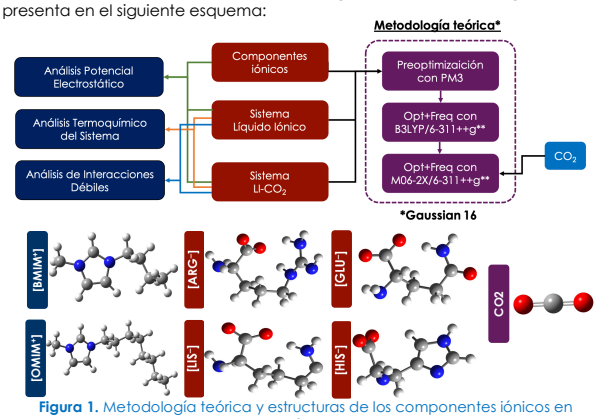


Figura 1. Metodología teórica y estructuras de los componentes iónicos en estudio y del dióxido de carbono.

RESULTADOS

I. OPTIMIZACIÓN DE LOS COMPONENTES IONICOS

Tabla 1. Diferencias de energía obtenidas en la optimización de los componentes ionicos analizados con los diferentes niveles de teoría aplicados.

COMPONENTE IÓNICO	ΔE PM3 (kcal/mol)	ΔE B3LYP (kcal/mol)	ΔE M06-2X (kcal/mol)	COMPONENTE IÓNICO	ΔE PM3 (kcal/mol)	ΔE B3LYP (kcal/mol)	ΔE M06-2X (kcal/mol)
[BMIM1+]	0	0	0	[ARG-]	0	0	0
[BMIM2+]	0.6639	0.0266	0.5397	[GLU-]	0	0	0
[BMIM3+]	0.6639	3.4775	0.5397	[LIS-]	0	0	0
[OMIM1+]	0	0	0	[HIS1-]	0	0.2855	0
[OMIM2+]	0.0017	0.01004	0	[HIS2-]	0.2855	0	0.8960

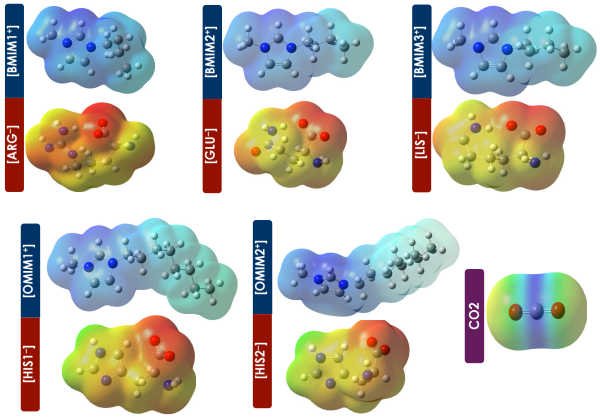


Figura 2. Potencial electrostático de las estructuras de mínima energía obtenidas en la optimización de la geometría con el nivel de TFD M06-2X/6-311++G** de los componentes iónicos y el CO_2

II. OPTIMIZACIÓN SISTEMA LÍQUIDO IÓNICO

Tabla 2. Entalpía, entropía y energía de Gibbs de los LIs formados con el ión [BMIM+], obtenidas en la optimización con el nivel M06-2X/6-311++G**.

LÍQUIDO IÓNICO	ΔH 298 K (kcal/mol)	ΔS298 K (cal/molK)	ΔG 298K (kcal/mol)	LÍQUIDO IÓNICO	ΔH 298 K (kcal/mol)	ΔS298 K (cal/molK)	ΔG 298K (kcal/mol)
[BMIM+][ARG-]	-78.45	-35.08	-67.99	[BMIM+][LIS1-]	-84.05	-25.19	-76.54
[BMIM+][GLU1-]	-90.77	-58.22	-73.41	[BMIM+][LIS2-]	-83.07	-26.71	-75.12
[BMIM+][GLU2-]	-82.72	-23.43	-75.74	[BMIM+][HIS1-]	-87.88	-23.82	-80.79
				[BMIM+][HIS2-]	-89.18	-27.41	-81.00

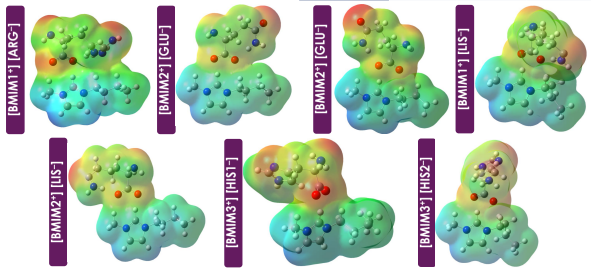


Figura 3. Potencial electrostático de las estructuras de mínima energía obtenidas en la optimización de los LIs formados con el ión [BMIM+] con el nivel DFT con M06-2X/6-311++G**.

III. INTERACCIÓN DEL SISTEMA LÍQUIDO IÓNICO CON CO2

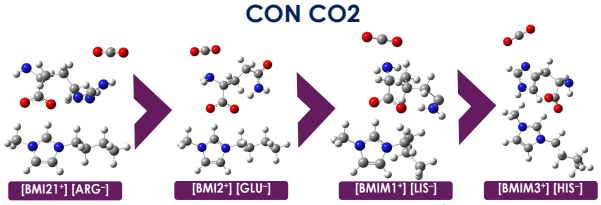


Figura 4. Resultados preliminares obtenidos en la optimización del sistema LI-CO_2 con el método semi empírico PM3.

CONCLUSIONES

- El proceso de formación de líquidos es exotérmico, exergónico y espontáneo.
- Existe un efecto del anión en las energías de interacción de los LIs y se rige por la siguiente tendencia de mayor a menor: Histidina>Lisina>Glutamina>Arginina
- En los resultados preliminares de la optimización del sistema LI-CO_2 se observa los LIs con mayor energía de interacción tienden a interactuar menos con el CO_2.
- El CO_2 tiende a interactuar con los grupos aminos dentro de la estructura del líquido iónico.

BIBLIOGRAFÍA

1. S. Pacala, R. Socolow, Stabilization Wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies, Science, 2004, 305, 968-973.
2. R. D. Rogers y K. R. Seddon, Ionic Liquid as Green Solvent. Washington, DC: America Chemical Society, 2003.
3. Kirchner B, Ionic liquids. Berlin, Heudelberg: Springer-Verlag, 2010.
4. H. Ohno y K. Fukumoto, Amino acid ionic liquids, Accounts of Chemical Research, 2007, 40(11), 1122–1129.
5. Y. S. Sista y A. Khanna, Carbon dioxide absorption studies using amine-functionalized ionic liquids, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20, 2497-2509.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la División de Ciencias Exactas y la Dirección de Posgrado e Investigación por permitirnos el uso de instalaciones, así como el financiamiento otorgado por la Vicerrectoría Académica del Instituto de Estudios Superiores de Tamaulipas, IEST-Anáhuac.
Los autores agradecen el apoyo otorgado a esta investigación por parte del Centro Nacional de Supercómputo del IPICYT, A.C., mediante el tiempo de cómputo otorgado al proyecto TKII-E-0424I-170424-26/PR-33: Mechanistic modeling of molecular disintegration in mixtures of unconventional feeds in FCC units

AISLAMIENTO Y CARACTERIZACION MORFOLOGICA DE MICORRIZAS ERICOIDES EN ESPECIES DE LA FAMILIA ERICACEAE

ESQUIVEL ARROYO RICARDO*; ZEPEDA GUZMAN SANTOS*.

[1]Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes, Los reyes Michoacán, 60320, México

Resumen

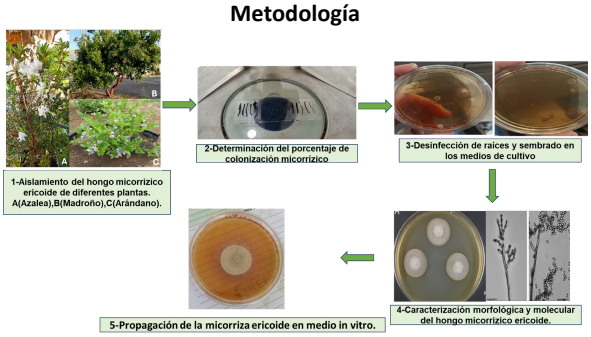
Las micorrizas son hongos simbióticos que colonizan raíces de plantas, estos reciben de las plantas azucares para desarrollarse a cambio captan del suelo y ceden a sus hospedantes nutrientes minerales y agua para crecer. La Micorriza Ericoide es importante en cultivos como el Arándano con asociaciones formando hifas intracelulares y ovillos (rollos) que movilizan nutrientes. En la región de Los Reyes se han estudiado muy poco el uso de estos, ya que caracterizar especies nativas de hongos Ericoides aislados de plantas Ericáceas es clave para el cultivo de arándano. Para lo cual se colectaron raíces de Madroño, Arándano y Azalea, las cuales se esterilizaron con Etanol 70%, cloro10%. Se sembraron en medio PDA para obtener los hongos ericoides. Se evaluó desarrollo caracterizándolos morfológicamente, se determinó la colonización. Los resultados mostraron presencia en un 70% en la raíz. Se obtuvieron tres aislados de raíz de Arándano, cuatro de raíz de Azalea.

Introducción

Los arándanos constituyen un grupo de especies nativas del hemisferio norte, que pertenecen al género Vaccinium de la familia de las Ericácea. El arándano es la cuarta frutilla de interés económico en el mundo, su consumo es de alto impacto ya que contienen antioxidantes y son beneficios para la salud humana, es uno de los frutos agroalimentario más exportado de México (Salgado Vargas, Sánchez García, Volke Haller, & Colinas León, 2018). En la actualidad en México la reproducción del cultivo de arándano se da en suelo e hidroponía (Blueberries, 2022). Por lo antes mencionado es uno de los cultivos con mayor énfasis en su manejo tanto mecánico y nutricional. En cuanto a lo nutricional no se le ha dado tanta relevancia al uso de hongos micorrízicos para optimizar su desarrollo, utilizando solo fertilizantes sin tomar en cuenta las micorrizas para mayor asimilación de los mismos.

Los hongos micorrízicos son microorganismos simbióticos que colonizan las raíces de las plantas, los cuales reciben directamente de las plantas los azucares que precisan para desarrollarse a cambio captan del suelo y ceden a sus hospedantes vegetales los nutrientes minerales y el agua que estos necesitan para crecer.

Metodología



Resultados

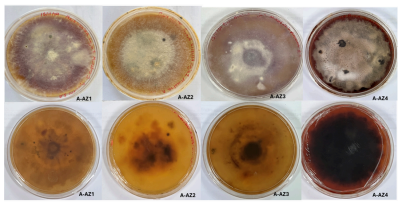


Figura 1. Aislados de hongos de planta de azalea vistas por parte frontal e inversa, A-AZ1(aislado 1 azalea), A-AZ2 (aislado 2 azalea), A-AZ3 (aislado 3 azalea), A-AZ4 (aislado 4 azalea).

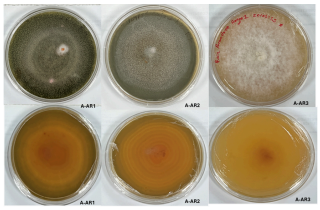


Figura 2. Aislados de hongos de raíz arándano biloxy, vistas por parte frontal e inversa. A-AR1(aislado 1 arándano).A-AR2(aislado 2 arándano), A-AR3(aislado 3 arándano).

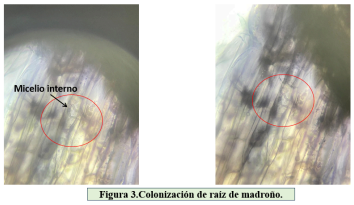


Figura 3.Colonización de raiz de madroño.

En los aislados de la raíz de azalea pudimos encontrar 4 cepas, cada una con características morfológicas diferentes como se observa en la figura 1, las cuales se están caracterizando en base a literatura citada mediante el color de la cepa, tiempo de crecimiento, tipo de halo, su consistencia, estructuras reproductoras. De las raíces de arándano se encontraron 3 aislados figura 2, que de igual forma se están caracterizando y de madroño figura 3 aún no se han aislado cepas de hongos endófitos anqe haa presencia de estructuras internas del hongo ericoide dentro de la raiz.

Conclusiones

Se siguen caracterizando las cepas mediante literatura citada y actualmente se siguen aislando nuevas cepas de las raíces de las tres especies de plantas de muestreo, por lo cual se están presentando en este cartel los resultados preliminares de un trabajo de maestría de agrobiotecnología del tecnológico de los reyes. Es de suma importancia el conocer más sobre la presencia y el buen uso de microorganismos benéficos que tenemos en suelos endémicos, que nos pueden aportar un beneficio de interés a nivel de producción, como lo son los cultivos de interés comercial, siendo más sustentables y por supuesto más amigables con el medio ambiente disminuyendo el uso de fertilizantes, con la ayuda de microorganismos como lo son los hongos micorrízicos.

Referencias

Camargo Ricalde, S. L., Manuel Montaño, N., Rosa Mera, C. J., & Montaño Arias, S. A. (2012). MICORRIZAS: UNA GRAN UNIÓN DEBAJO DEL SUELO. *Revista Digital Universitaria*, 5-12.

Baltierra Zamudio M. (2024) Informe tesis profesional

Bedoya Reina, O. C. (2005). REVISIÓN DE LA COEVOLUCIÓN DE SISTEMAS MICORRIZAS ERICOIDES-ERICACEAE. *UNIVERSIDAD DE LOS ANDES FACULTAD DE CIENCIAS*, 11-12.

R. Carrillo, J. G.-G. (2015). *Colonización de plántulas de arándano (Vaccinium corymbosum) por micorrizas ericoides en condiciones de vivero.* Temuco, Chile.: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad de La Frontera,.

Evaluación de la actividad antifúngica e inhibición de la producción de esporas de especies de la familia Asteraceae

Alexei González-Arizmendi*, Alfredo Quinto-Hernández*, José Francisco Carpio-Pineda**, Macdiel Acevedo-Quiroz*

*Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM/IT de Zacatepec.

**Departamento de Ciencias Básicas, TecNM/IT de Zacatepec.

Resumen

Los hongos fitopatógenos amenazan la agricultura global, causando pérdidas económicas y resistencia a fungicidas sintéticos. Este estudio evaluó la actividad antifúngica de extractos de *Tagetes lucida*, *T. remotiflora* y *Dyssodia tagetiflora* (Asteraceae) contra *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum sp.* Los extractos, obtenidos por maceración con solventes de polaridad creciente (hexano, diclorometano, acetona y metanol), fueron caracterizados mediante CCF y GC-MS. El extracto metanólico de *T. lucida* mostró la mayor eficacia, inhibiendo 50–90% del crecimiento micelial y hasta el 100% de la esporulación a 16 mg/mL. Se identificaron cumarinas (herniarina y escoparona) como compuestos bioactivos clave. Los resultados respaldan el potencial de estas especies como fuente sostenible de antifúngicos naturales para el control agrícola.

Introducción

- "Los hongos fitopatogenos como Fusarium oxysporum y Colletotrichum sp. causan pérdidas significativas en la agricultura global. El control con fungicidas sintéticos ha generado problemas de resistencia y impacto ambiental, por lo que es urgente buscar alternativas sostenibles. Las plantas de la familia Asteraceae son reconocidas por producir metabolitos secundarios con actividad biocida. Este estudio se centró en evaluar el potencial antifúngico de tres especies de esta familia: Tagetes lucida, T. remotiflora y Dyssodia tagetiflora, utilizadas en la medicina tradicional mexicana. El objetivo fue caracterizar sus extractos, identificar los compuestos bioactivos y cuantificar su capacidad para inhibir el crecimiento micelial y la esporulación de hongos fitopatógenos."

Tagetes Lucida

Tagetes remotiflora

Dyssodia tagetiflora

Metodología

1. Colecta y Extracción:
Las plantas se colectaron en [Zacatepec Morelos]. El material vegetal se secó y se pulverizó. La extracción se realizó por maceración sucesiva con solventes de polaridad creciente: hexano, diclorometano (DCM), acetona y metanol (MeOH).

2. Análisis Fitoquímico:
"Los extractos se caracterizaron mediante Cromatografía en Capa Fina (CCF) y Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas (GC-MS). Se cuantificaron metabolitos como flavonoides y alcaloides."

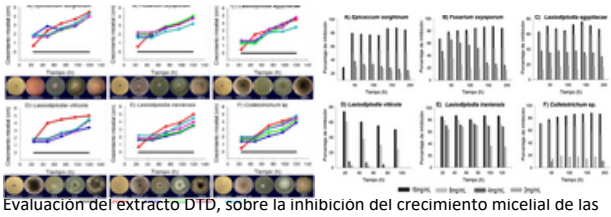
3. Ensayos Biológicos (Actividad Antifúngica):
"La actividad antifúngica se evaluó contra Fusarium oxysporum, Colletotrichum sp., Lasiodiplodia vitícola y L. egyptiaceae. Se midió la inhibición del crecimiento micelial en placas con agar-patato-dextrosa (PDA), incorporando los extractos a concentraciones de 4, 8 y 16 mg/mL. El porcentaje de inhibición se calculó comparando con un control. La inhibición de la esporulación se evaluó tras 7 días de incubación."

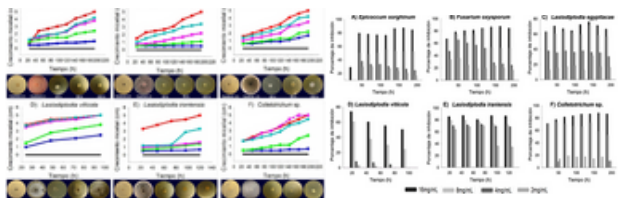
4. Ensayos de Actividad Antifúngica
Cepas Fúngicas: Fusarium oxysporum, Colletotrichum sp., Lasiodiplodia vitícola, L. egyptiaceae Medio de Cultivo: Agar Papa Dextrosa (PDA)
Diseño Experimental:
Los extractos se incorporaron al PDA a concentraciones de 4, 8 y 16 mg/mL. Se inocularon discos de micelio (5 mm diámetro) de cultivos de 7 días
Control positivo: [Nombre del fungicida comercial, si se usó]
Control negativo: PDA sin extracto
Evaluación:
Inhibición del Crecimiento Micelial: Diámetro colonial medido cada 24h por 7 días
Cálculo: % Inhibición = [(Dc - Dt)/Dc] × 100
Dc = Diámetro del control
Dt = Diámetro del tratamiento
Inhibición de Esporulación: Recuento de esporas en cámara de Neubauer después de 7 días

5. Análisis Estadístico
Diseño: Completamente al azar con 3 repeticiones por tratamiento
Análisis: ANOVA y prueba de Tukey (p < 0.05) usando software [nombre del software, ej. SPSS v25]
Expresión de Resultados: Media ± Desviación Estándar

Resultados

El extracto metanólico de *T. lucida* presentó el mayor rendimiento (5.44%), seguido por el de diclorometano (1.26%) y acetona (3.45%). El perfil fitoquímico del extracto metanólico (TLM) mostró un alto contenido de flavonoides (83%) y alcaloides (33.3%). Mediante GC-MS se identificaron 23 compuestos, entre los que destacaron herniarina (70% en el extracto diclorometánico) y escoparona. En cuanto a la actividad antifúngica, TLM alcanzó una inhibición micelial del 90% en *Fusarium oxysporum* y del 86% en *Colletotrichum sp.* a una concentración de 16 mg/mL, suprimiendo además al 100% la esporulación en ambas cepas. En contraste, los extractos diclorometánico (DTM) y acetónico (DTD) presentaron efectos menores (30–50% de inhibición), con excepción del DTM frente a *Lasiodiplodia vitícola*, donde alcanzó un 96% de inhibición. El extracto metanólico de *T. remotiflora* (TRM) mostró una inhibición moderada (47.5%) en *L. vitícola*, pero promovió la esporulación en *L. egyptiacae*. Los análisis estadísticos revelaron una correlación significativa entre la concentración de los extractos y el efecto inhibitorio observado ($p < 0.05$).


Evaluación del extracto DTD, sobre la inhibición del crecimiento micelial de las cepas de HFTP


Evaluación del extracto TLM, sobre la inhibición del crecimiento micelial de las cepas de HFTP

Conclusiones

Los extractos metanólicos de *T. lucida* mostraron alta actividad antifúngica por herniarina y escoparona, inhibiendo crecimiento micelial y esporulación. El metanol fue más eficaz para extraer metabolitos, y el diclorometano selectivo para cumarinas. *D. tagetiflora* podría generar sinergias. *T. remotiflora* incrementó esporulación en *L. egyptiacae*. Las Asteraceae destacan como fuente sostenible de antifúngicos.

Referencias

1. Almazán-Morales, A. et al. (2022). Actividad antifúngica de extractos vegetales. Rev. Mex. Fitopatol., 40(1), 25–32.
2. Ríos, M. Y. et al. (1988). Métodos de evaluación antifúngica. Rev. Latinoam. Quím., 19(3), 143–150.
3. Nárdez, L. R. et al. (2006). Control biológico de enfermedades vegetales. UAChapingo.
4. INIFAP. (s.f.). Investigación para el desarrollo rural sustentable. https://www.gob.mx/inifap
5. NCBI. (s.f.). PubChem. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/

EVALUACIÓN DEL EFECTO AGLUTINANTE DE NANOCRISTALES DE CELULOSA EN PASTILLAS DE CARBÓN ACTIVADO

MC. Torres Hernández Carlos*, Dr. Castro Guerrero Carlos Fernando *, Dra. Morales Cepeda Ana Beatriz*
* Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

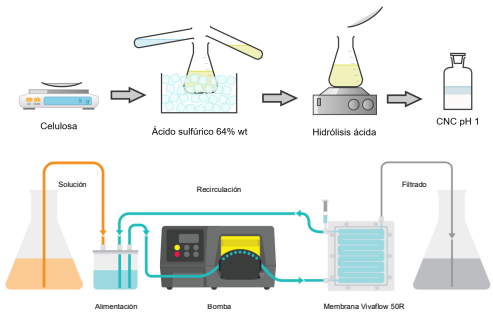
Resumen

Estudio de la aplicación de Nanocristales de Celulosa (NCC) como agente aglutinante para la preparación de pastillas formadas a partir de carbón activado en polvo fino. Los NCC se sintetizan a partir de una hidrolisis ácida, en la que se obtiene una suspensión con bajo pH. Para ser utilizado como aglutinante, dicho pH es neutralizado a través de una diálisis, con una membrana reutilizable, que ha proporcionado un menor consumo de agua comparado a métodos tradicionales con membranas desechables.

Introducción

La celulosa es el polímero natural más abundante en nuestro planeta, posee propiedades físicas y mecánicas equiparables a otros materiales sintéticos manteniendo su biodegradabilidad. En los últimos años se ha estudiado su forma cristalina más pequeña (10-100 nm) los nanocristales de celulosa (NCC) los cuales se obtienen mediante un proceso llamado hidrolisis ácida, que degrada las partes amorfas de la celulosa y aísla las partes cristalinas. Estos cristales han demostrado mantener las mejores propiedades de la celulosa y mejorar otros materiales a los que se añade, incluso utilizando bajos porcentajes de CNC. En este proyecto se evalúa el efecto aglutinante, es decir, la propiedad que mantiene unida un cumulo de material que generalmente permanece disperso sin un agente que la aglutine. Esto en pastillas con distintos porcentajes de CNC, utilizando como material el carbón activado, que tiene múltiples usos gracias a sus propiedades como la porosidad, y que en combinación con los CNC han demostrado ser un eficiente capacitor de origen natural.

Metodología



La primera etapa de la metodología consiste en una síntesis mediante hidrolisis acida utilizando H_2SO_4, Mientras que la segunda consiste en una diálisis para ajustar la suspensión a un pH cercano al neutro, utilizando agua destilada.

Resultados

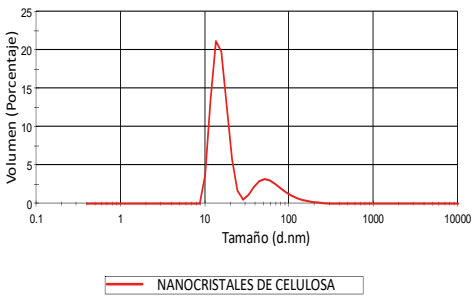


Figura 1. Distribución del tamaño del diámetro de partícula por volumen. Caracterización DLS.

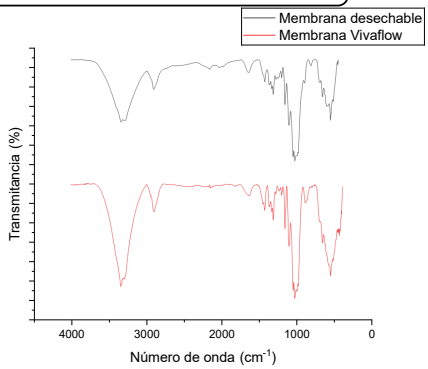


Figura 2. Comparativa de espectroscopia infrarroja de NCC en ambas membranas.

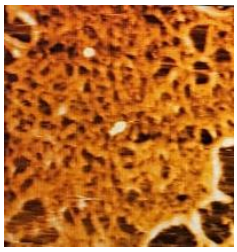


Figura 3. AFM de superficie cubierta por NCC sintetizados

Conclusiones

Por el momento, se determina que las modificaciones en el método tradicional de diálisis han dado un resultado positivo, tanto en el ahorro de agua como en la obtención de NCC similares a las obtenidas por métodos tradicionales. Esto se puede comprobar a través de las caracterizaciones realizadas, a través del tamaño de partícula, confirmando que se tienen las condiciones de tamaño necesario para ser llamados Nano. Por otra parte, en cuanto a la naturaleza del material, se confirma a través de la espectroscopia infrarroja que se trata de celulosa. Se espera continuar con la elaboración de pastillas de carbón activado para evaluar las propiedades de dichos cristales como agente aglutinante.

Referencias

1. Castro-Guerrero, C.F., et al. "Self-ordered cellulose nanocrystals and microscopic investigations" Materials Science-Poland, vol. 38, no. 4, Sciendo, 2020, pp. 613-618. https://doi.org/10.2478/msp-2020-0068
2. Castro–Guerrero, C. F., González-Benítez, A., Rodríguez-Rodríguez, A., Delgado-Arroyo, F., León-Silva, U., Morales-Cepeda, A. B., López-González, F. A., Rodas-Grapain, A., & Díaz-Guillén. (2023). Optimization of the synthesis parameters and application of cellulose nanocrystals as binders in capacitors. International Journal of Polymer

Kinder360 - Herramienta para docentes

José Jesús Everardo Pérez Salazar, M.T.I. María Guadalupe Amézquita Delgado
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato -Tecnológico Nacional De México - CENIDET

Resumen

El proyecto Kinder360 consistió en desarrollar una plataforma web para apoyar a docentes de preescolar en la evaluación de alumnos y la generación automática de observaciones pedagógicas, con el fin de reducir la carga administrativa y mejorar la eficiencia educativa. Se aplicó una metodología descriptivo-aplicada, basada en entrevistas con docentes, diseño centrado en el usuario y tecnologías web abiertas como HTML5, CSS3, JavaScript, PHP y MySQL. El sistema resultante permite organizar datos, evaluar por criterios y generar observaciones coherentes. Las pruebas demostraron su estabilidad y utilidad, concluyendo que la tecnología puede complementar eficazmente la labor docente en preescolar además de reducir la carga de la misma.

Introducción

En el nivel preescolar, los docentes enfrentan una carga administrativa significativa que puede limitar la atención personalizada a los alumnos. Las evaluaciones y reportes manuales generan retrasos y duplicación de esfuerzos. Ante el avance de la digitalización educativa, se vuelve necesario adoptar herramientas tecnológicas que optimicen el trabajo docente.

Este proyecto plantea el desarrollo de una plataforma web para preescolar que automatiza la generación de observaciones pedagógicas a partir de las evaluaciones, reduciendo el tiempo dedicado a tareas repetitivas. Además de mejorar la eficiencia, busca fomentar el uso de tecnología en el entorno escolar. Al agilizar procesos administrativos, permite a los maestros enfocarse en el desarrollo integral de los niños. La solución propuesta es práctica, sencilla y adaptada a las necesidades reales del aula. El objetivo principal es implementar una herramienta que facilite la evaluación y generación automática de observaciones.

Metodología

El desarrollo de Kinder360 se fundamentó en una metodología descriptivo-aplicada, iniciando con entrevistas informales a docentes para identificar los retos en la evaluación y redacción de observaciones. A partir de estos insumos, se diseñó una estructura web compuesta por un menú principal, sección de alumnos, formulario de evaluación y módulo de generación automática de observaciones. La plataforma fue construida con tecnologías web de código abierto: HTML5 y CSS3 para el diseño visual, JavaScript para la interactividad, PHP para la lógica del servidor y MySQL como sistema de gestión de base de datos. Para validar su funcionamiento, se realizaron pruebas con datos simulados, evaluando módulos clave como el registro de usuarios, la evaluación por criterios y la generación automática de observaciones pedagógicas. Estos ensayos confirmaron la estabilidad y funcionalidad del sistema.

Objetivos

General:
Desarrollar una plataforma web que facilite a los docentes de educación preescolar la evaluación organizada y automatizada de sus alumnos, reduciendo la carga administrativa y favoreciendo una mayor dedicación a la atención pedagógica directa.

Específicos:

- Diseñar y programar un sistema que permita la evaluación de los alumnos por criterios previamente definidos.
- Implementar herramientas que generen de forma automática observaciones pedagógicas personalizadas para cada estudiante.
- Optimizar la gestión de datos de evaluaciones y avances, garantizando un registro seguro y accesible para los docentes.
- Comprobar la funcionalidad del sistema a través de pruebas técnicas, identificando áreas de mejora antes de su aplicación en entornos escolares reales.

Resultados

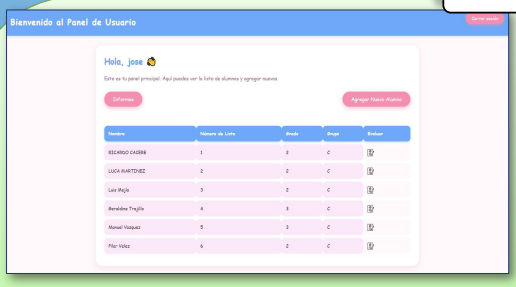


Imagen 1.1 Tabla de alumnos completos por grupo.

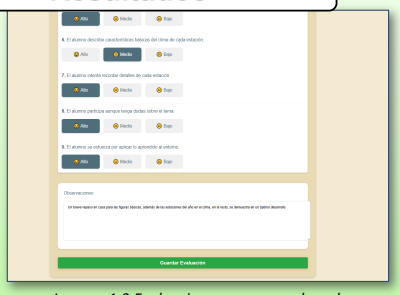


Imagen 1.2 Evaluacion paso a paso de cada alumno

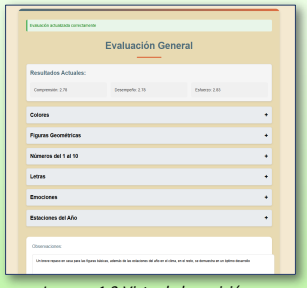


Imagen 1.3 Vista de la revisión por alumno.

El proyecto Kinder360 logró crear una plataforma web funcional que ayuda a los docentes de preescolar a evaluar a sus alumnos de manera organizada y automática. El sistema simplifica la gestión de datos, permite la evaluación por criterios y genera observaciones pedagógicas de forma automática.

Estas herramientas digitales reducen la carga administrativa, lo que coincide con estudios previos que sugieren que la tecnología puede mejorar los procesos educativos cuando está centrada en las necesidades del usuario. La plataforma no reemplaza al docente, sino que lo complementa al sistematizar el registro de avances, permitiéndole dedicar más tiempo a la atención directa de los alumnos. Sin embargo, el estudio tuvo limitaciones, como no haber sido probado con usuarios reales en un entorno escolar.

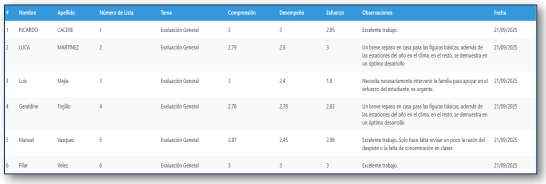


Imagen 1.4 Vista de las calificaciones y desarrollo con comentarios finales por alumno

Conclusiones

Kinder360 facilita la labor docente en preescolar al reducir la carga administrativa mediante la automatización de observaciones pedagógicas. Esto permite a los maestros dedicar más tiempo al desarrollo integral de los alumnos.

El diseño centrado en el usuario, basado en entrevistas, asegura que la plataforma responda a necesidades reales del entorno escolar, favoreciendo su adopción.

Gracias al uso de tecnologías web abiertas, el sistema es accesible, funcional y adaptable a distintos contextos educativos.

Las pruebas con datos simulados confirmaron la estabilidad del sistema y el cumplimiento de sus objetivos.

En conjunto, Kinder360 complementa la labor docente, mejora la eficiencia educativa y promueve el uso responsable de la tecnología en el aula.

Referencias

- Area Moreira, M. (2014). La integración de las TIC en el currículo escolar: implicaciones pedagógicas y didácticas. Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa, 13(2), 35–50.
- Cabero-Almenara, J., & Llorente-Cejudo, M. C. (2020). Tecnologías emergentes en educación: fundamentos, aplicaciones y retos. Octaedro.
- Coll, C., & Monereo, C. (2010). Psicología de la educación virtual: aprender y enseñar con las tecnologías de la información y la comunicación. Morata.
- López, M. (2017). Tecnología educativa para la mejora de la práctica docente en educación básica. Revista Electrónica Educare, 21(3), 1–20. https://doi.org/10.15359/ree.21-3.9Marqués, P. (2015). Las TIC y su integración en el currículo escolar. Aula de Innovación Educativa, 240, 12–18.
- Mejía, R., & Torres, C. (2020). Uso de plataformas educativas para facilitar la labor docente en el nivel inicial. Revista Conrado, 16(76), 132–139.
- Peña, J. A., & Gómez, J. (2015). Implementación de sistemas de gestión académica en instituciones educativas públicas. Revista de Tecnología e Innovación, 11(2), 99–110.
- Rodríguez, A., & Pérez, L. (2019). Automatización de procesos administrativos en la educación preescolar mediante aplicaciones web. Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, 14(1), 21–29.

Dispositivo con Películas Delgadas de 1D-TiO_2 con Puntos Cuánticos de CdS para la Producción de Hidrógeno

Luis Antonio García Contreras*, Rafael G. Suárez Nájera*, Mario Rodríguez Varela**, José O. Flores Flores**, Rodolfo Zanella Specia**, Roberto Y. Sato Berrú**, José A. Chávez Carvayar*

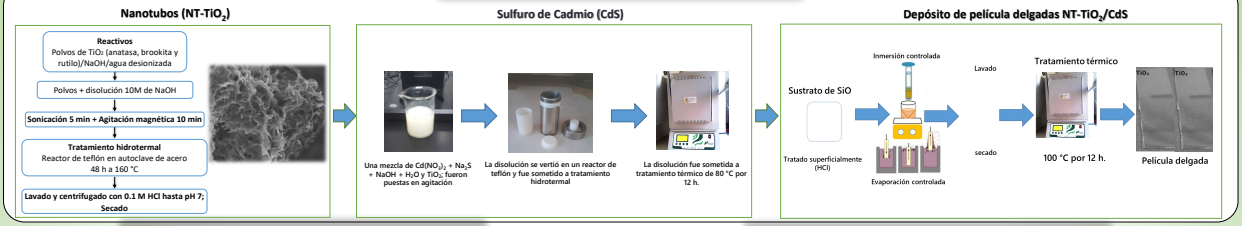
* Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, México City.
**Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, México City.

Introducción

Actualmente, un tema de elevado interés para la sociedad como para la comunidad científica es el desarrollo de tecnologías para obtención de energías renovables y sustentables como la producción y uso del hidrógeno, aunque existen varias tecnologías y formas de obtenerse, aún siguen siendo insuficientes para satisfacer la demanda de este sector energético. Una tecnología prometedora para producir hidrógeno de manera limpia, sin subproductos nocivos y amigables con el medio ambiente es la fotocatálisis, la cual se basa en el uso de materiales semiconductores con amplias propiedades fotoquímicas entre que destacan los materiales unidimensionales de TiO_2, propiedades que suelen relacionarse con la estructura cristalina, tamaño y forma del material. Este material puede ser susceptible a mejoras como el depósito de otros materiales como los puntos cuánticos de CdS, lo que los hace más eficientes para producir hidrógeno. Además, otra área de interés es la implementación de manera eficiente de estos materiales en dispositivos fotocatalíticos, para favorecer la exposición de estos materiales a la luz utilizada, la recuperación del material y su utilización *in-situ* para generar energía.

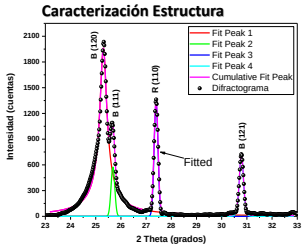
En este trabajo mostramos las condiciones de síntesis para la obtención de un material unidimensional de TiO_2 como los nanotubos, así como, el cambio o transformación estructural y el depósito de puntos cuánticos como CdS por un método fácil y eficiente, para la mejora en la producción de hidrógeno, al implementarlo en películas delgadas en un dispositivo de recirculación.

Proceso experimental

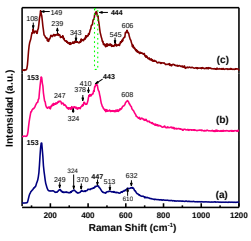


Caracterización

Caracterización Estructura

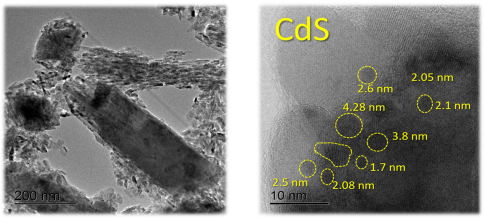


Ejemplo de deconvolución de patrones de difracción de rayos X de una muestras. Puntos: experimental.



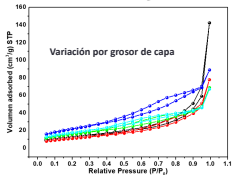
Espectros Raman deTiO_2 (nanotubos) con CdS.

Caracterización Morfológica

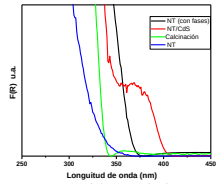


Imagines de Microscopia Electrónica de Transmisión de alta resolución (HR-TEM) de las morfologías y los puntos cuánticos de CdS.

Caracterización Fisicoquímica

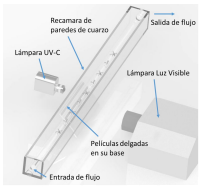


Isotermas de absorción/desorción de N_2 de los materiales de TiO_2 con CdS.



Espectros UV-Vis de los materiales de TiO_2 con CdS.

Producción de hidrógeno



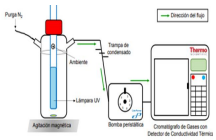
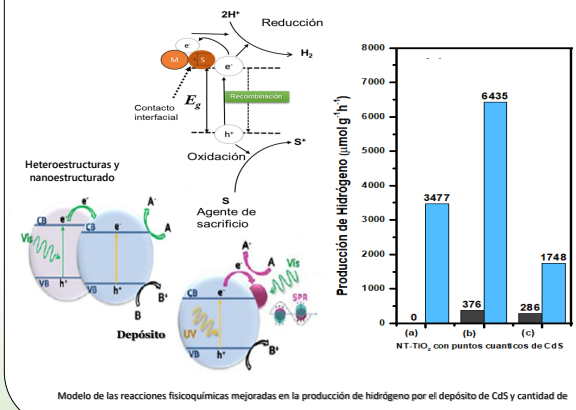


Diagrama del dispositivo de películas delgadas y arreglo experimental (ICAT-UNAM) para la producción y cuantificación de hidrógeno.



Modelo de las reacciones fisicoquímicas mejoradas en la producción de hidrógeno por el depósito de CdS y cantidad de hidrógeno producido.

Conclusiones

En este trabajo se observó que los materiales sintetizados exhibieron una actividad fotocatalítica favorable para la producción de hidrógeno, con un posterior depósito de puntos cuánticos de CdS, la tasa de producción de hidrógeno mejoro sustancialmente, aproximadamente 18 veces más que el material base, el depósito de los materiales en películas delgadas favoreció los procesos de producción de hidrógeno y recuperación del material para realizar procesos de ciclado.

Agradecimientos

Luis Antonio Garcia Contreras agradece a SECIHTI por la beca CVU 667265. Los autores también agradecen al Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) y a la Dra. Selene R. Islas por la caracterización UV-Vis. Al Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental (LUNA) y a la M.Sc. Viridiana Maturano Rojas por la caracterización del método BET y por su asistencia técnica en pruebas fotocatalíticas en producción de hidrógeno (Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, ICAT-UNAM); al Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica (LUME) del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM) y a la M.Sc. Adriana Tejeda Cruz y al Fís. Josué E. Romero I. por la asistencia técnica en la caracterización estructural y morfológica.

Referencias

- M. Laimon, et al. Exploring sustainable solutions for energy independence and self-sufficiency using integrated renewable energy-driven hydrogen system, Renew. Energy 222 (2024) 119948. doi.org/10.1016/j.renene.2024.119948.
- S.K. Singh, et al. Solar-powered hydrogen production: Advancements, challenges, and the path to net-zero emissions, Int. J. Hydrog. Energy 84 (2024) 549–579. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.209.
- M. Ge, et al. A review of TiO_2 nanostructured catalysts for sustainable H_2 generation, Int. J. Hydrog. Energy 42 (2017) 8418–8449. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.052.
- J. Cai, et al. Light-Driven Sustainable Hydrogen Production Utilizing TiO_2 Nanostructures: A Review, Small Methods 3 (2019) 1800184. doi.org/10.1002/smtd.201800184.
- G. Sadanandam, et al. Cu oxide quantum dots loaded TiO_2 nanosheet photocatalyst for highly efficient and robust hydrogen generation, Appl. Surf. Sci. 541 (2021) 148687. doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148687.
- S. Guo, et al. Amorphous quantum dots co-catalyst: Defect level induced solar-to-hydrogen production, Appl. Catal. B Environ. 330 (2023) 122583. doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122583.
- H. Su, et al. Recent advances in quantum dot catalysts for hydrogen evolution: Synthesis, characterization, and photocatalytic application, Carbon Energy 5 (2023). doi.org/10.1002/cey2.280.
- Nilpawan Sarma, et al.Thin Film Approach for Scalable Production of Hydrogen through Photocatalysis, ACS Symposium Series Vol. 1467 (2024) doi.org/10.1021/bk-2024-1467.ch008

Evaluación de la Capacitancia de un Carbón Activado

Carlos F. Castro-Guerrero[1], Ana B. Morales-Cepeda[2], Carlos Torres-Hernández,[2] Ulises León-Silva[3], Jesús Escobedo-Alatorre[3]

[1] CONAHCyT-TecnM campus Ciudad Madero. Ave. 1 de mayo s/n, Col. Los Mangos. Ciudad Madero, Tam. C. P. 89440.
[2] TecnM campus Ciudad Madero. Ave. 1 de mayo s/n, Col. Los Mangos. Ciudad Madero, Tam., C. P. 89440.
[3] Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Ave. Universidad 1001, col. Chamilpa, Cuernavaca, Mor., C. P. 62209.

Resumen.
Las energías limpias han tomado un papel crucial en los últimos años debido al calentamiento global. La intermitencia es un problema de las energías limpias, el cual se combate con almacenamiento de energía. Los agentes aglutinantes son un elemento crítico de los capacitores, debido a que le dan cohesión al electrodo. El agente aglutinante ideal es el que le da cohesión al electrodo, y no interfiere con la transferencia de carga, además de que no contamina. En este trabajo, se evalúa el efecto de la nanocelulosa como agente aglutinante en supercapacitores.

Introducción

En los últimos años la humanidad ha enfrentado el cambio climático, que ha elevado la temperatura promedio del planeta. El cambio climático es producto del uso de combustibles fósiles, que emiten CO_2 a la atmósfera. Para mitigar las emisiones de CO_2, el mundo está recurriendo a energías limpias, las cuales son energías renovables y que no contaminan.

La ONU se ha fijado la Agenda 2030, en la que se contempla reducir las emanaciones de CO_2. Nuestro país tiene sus metas para la generación de energías limpias, las cuales se resumen en la tabla 1.[1] Visto esto, el almacenamiento de energía es un tema crucial.

Tabla 1. Metas de energía limpia

Año	Porcentaje de Energía Limpia
2021	30%
2024	35%
2030	37.5%
2050	50%

En el año 2021 la generación de energías limpias fue del 29%, 1% menor a la meta.
Sin embargo, las energías limpias tienen una desventaja, la cual consiste en la intermitencia, que es cuando no puede haber generación de electricidad. El sol sólo brilla de día, además de que en los días nublados no hay generación solar de electricidad. El viento no siempre sopla, y la sequía afecta a las hidroeléctricas. Para remediar la intermitencia se usa el almacenamiento de energía. Entre las tecnologías para combatir la intermitencia están los capacitores, los supercapacitores y las baterías. En este proyecto evaluamos el efecto aglutinante de la nanocelulosa, un agente aglutinante, en carbón activado.

Metodología

Los nanocristales de celulosa por el método del ácido sulfúrico.[2] Los nanocristales se fabrican mezclando 1 gramo de celulosa con 17.5 mL de ácido sulfúrico al 64% peso. La mezcla se calienta a 45°C por 45 minutos. El proceso se termina diluyendo con agua destilada fría por un factor de 10. Los nanocristales se centrifugan para colectarlos. Después se dializan con agua destilada. Posteriormente, se sonican a 200 W de potencia. Finalmente, se filtran con filtros de microfibra de vidrio de 450 nm de diámetro. Los nanocristales obtenidos se guardan en un refrigerador químico. La concentración de la nanocelulosa obtenida fue 0.1497% peso.

La suspensión de nanocristales de celulosa (CNC) se usan como agente aglutinante en supercapacitores. Como colector se usa hoja de cobre de 10 mm de espesor, el cual es flexible. El colector tiene un área efectiva de 1 cm^2, con tiras para conectarlo a un potenciostato. El electrodo se fabrica mezclando con carbón activado. A la mezcla fabricada se le dio cohesión añadiendo la CNC gota a gota hasta formar una pasta, la cual fue untada en los colectores. Los colectores con el electrodo fueron secados en un horno a 60°C para evitar la desulfatación de la CNC. También se fabricaron capacitores usando agua para evaluar las diferencias en el capacitor entre usar la nanocelulosa y no usarla. En las figuras 1 y 2 se pueden ver el capacitor preparado y siendo probado por voltametría cíclica.

Figura 1.- Capacitor

Figura 2.- Capacitor siendo probado

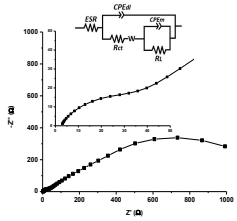


Figura 4.- Diagrama de Nyquist del dispositivo de grafito puro.

Tabla 2.- Capacitancias de los supercapacitores

Velocidad, mV/s	Capacitancia, F/g
2	769
10	402
20	347
50	358
100	183

Resultados

Las figuras 3 y 4 muestran los resultados de la caracterización electroquímica del supercapacitor. A mayores velocidades se tiene un comportamiento similar al del supercapacitor.
Los resultados muestran que el carbón activado tiene una alta capacitancia, y es ideal para la fabricación de electrodos.

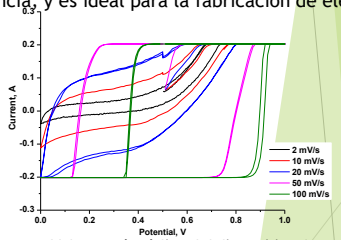


Figura 3.- Voltametría cíclica del dispositivo de grafito puro.

La tabla 2 muestra los resultados de capacitancia de los dispositivos.
La mayor capacitancia se otuvo a una velocidad de 2 mV/s. Las capacitancias son altas, indicando comportamiento de supercapacitor. La voltametría cíclica muestra comportamiento similar al supercapacitor. El diagrama de Nyquist muestra un semicírculo, mostrando también que el dispositivo tiene comportamiento de supercapacitor.

Conclusiones

El Carbón activado obtuvo una alta capacitancia, lo que lo hace apto para su uso en supercapacitores. La nanocelulosa no interfirió en la transferencia de carga en el supercapacitor, por lo que es un buen agente aglutinante.

Referencias
1. SENER Mexico, Prospectiva de Energías Renovables, Mexico City, 2016.
2. 5. Castro-Guerrero, C. F.; Morales-Cepeda, A. B.; Díaz-Guillén, M. R.; Delgado Arroyo, F.; López-González, F. A. Self-Ordered Cellulose Nanocrystals and Microscopic Investigations. Mater. Sci.-Pol. 2020, 38, 613-628.

EVALUACIÓN DE MCF MEDIANTE CURVAS DE POLARIZACIÓN, COMPARACIÓN DE TÉCNICAS (POTENCIOMETRO VS MANUAL).

Israel de Jesús López Muñoz 1 , Claudia Karina Zagal Padilla 2 , Alberto Armando Álvarez Gallegos 1
1 Centro de Investigación de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp-UAEM).
2 Instituto de Ciencias Físicas de la (ICF-UNAM).

Resumen

Este estudio evalúa el rendimiento de dos MFC's ensambladas con sedimento de la laguna de Coatetelco (inóculo) y sargazo tamizado (sustrato). El objetivo fue comparar dos técnicas de caracterización por resistencia variable: un potenciómetro (Celda A) y un método manual (Celda B). Adicionalmente, se analizó el efecto de añadir sulfato de sodio (Na_2SO_4) y acido sulfúrico (H_2SO_4). Los resultados muestran que la Celda A (potenciometro) fue el sistema más exitoso, alcanzando una potencia máxima de $12.5\mu Wcm^{-2}$en su condición de blanco y exhibiendo menores pérdidas de voltaje. En ambas celdas, la adición de Na_2SO_4 fue perjudicial.

Introducción

Las celdas de combustible microbianas (MCF), son sistemas bioelectroquímicos, que generan energía eléctrica útil a partir de una conversión electroquímica que usa un combustible biodegradable debido al metabolismo de las bacterias electrogénicas de la celda (Vega, 2024). Sin embargo, al ser una tecnología en desarrollo, se busca resolver problemas a nivel laboratorio, antes de su escalamiento en el ámbito industrial. Una de las herramientas para evaluar el rendimiento de las MCF, son las curvas de polarización, en estas, se miden las perdidas de voltaje, cuando se extrae la corriente, para encontrar la potencia máxima. Habitualmente, se usan técnicas de resistencia variable, para llevar acabo estas técnicas de caracterización.

Metodología

Se ensamblaron 2 MCF en contenedores de 1 L: usando sedimento proveniente de la laguna de Coatetelco, como portador de bacterias; sargazo tamizado a 60 mesh, como sustrato; ánodo de malla de acero inoxidable y cátodo de tela de carbono. Se evalúo el rendimiento de ambas celdas mediante técnicas de resistencia variable.

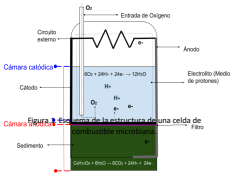


Figura 4. Esquema de la estructura de una celda de combustible microbiana

En la celda A, la resistencia fue variada mediante una caja de cambios con un potenciómetro interno, mientras que para la celda B, la resistencia fue cambiada manualmente. Se agrego sulfato de sodio y acido sulfúrico en ambas celdas y se obtuvieron curvas para cada uno.

Resultados

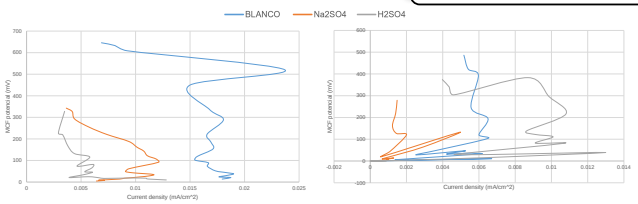


Figura 2. Curva de polarización de la celda A (cambio por potenciómetro).

Figura 5. Curva de polarización de la celda B (cambio por resistencia manual).

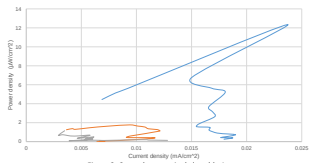


Figura 3. Curva de potencia de la celda A.

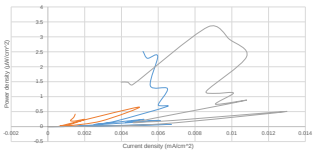


Figura 5. Curva de potencia de la celda B.

La celda A, presentó mejores resultados en su condición de blanco, pues la $P_{máx} = 12.5\mu Wcm^{-2}$ (figura 3), y exhibió menores perdidas de voltaje (figura 2). La celda B, tuvo un rendimiento general más bajo, y su mejor condición fue, de forma anómala, cuando se le adicionó acido sulfúrico, pues su $P_{máx} = 3.4\mu Wcm^{-2}$(figura 5). En ambas celdas, la adición de sulfato de sodio, fue perjudicial.

Esto sugiere que el método de medición y las condiciones de aclimatación de las celdas fueron significativamente diferentes, siendo la celda A, correspondiente al método de potenciómetro, el sistema más exitoso.

Se prevé, continuar con la experimentación, pero ahora, implementando una celda C, la cual se mida mediante resistencia variable, automatizada mediante el software de LabVIEW.

Conclusiones

Ambas celdas al ser construidas mediante la misma metodología, la diferencia del rendimiento, se puede reducir a la población bacteriana de la parte de lodo tomada para cada celda y a las diferencias entre ambos métodos de cambio de resistencias. En el caso de la celda B, entre cada cambio de resistencia, al sustituirse de manera manual, se deja en circuito abierto por un momento, afectando a la cinética de las mediciones y midiendo una serie de arranques, en lugar de un barrido, de la resistencia más grande a la más pequeña (Menicucci et al., 2006). En un sistema automatizado, con un barrido constante de resistencias, se sigue un principio cuasi-estatico, evitando errores y degradación en la curva (Baudy et al., 2022).

Referencias

- Baudy, M., Jaafar, A., Turpin, C., Abbou, S., & Rigal, S. (2022). High-temperature PEM Fuel Cell Characterization: an Experimental Study Focused on Potential Degradation due to the Polarization Curve. E3S Web of Conferences, 332, 04017. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233204017
- Menicucci, J., Beyenal, H., Marsili, E., Veluchamy, R. A., Demir, G., & Lewandowski, Z. (2006). Procedure for determining maximum sustainable power generated by microbial fuel cells. Environmental Science & Technology, 40(3), 1062–1068. https://doi.org/10.1021/es051180l
- Vega Gonzáles, M. (2024). Aplicaciones de las celdas de combustible microbiano. Ambiociencias, 21, 55-67. https://doi.org/10.18002/ambioc.i21.8183

Control neuronal con zona muerta y saturación para un MRM.

Raúl Alegría Gómez, Manuel Adam Medina, Jarniel García Morales, Arturo Daniel Espinosa Pedroza
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Resumen

Se desarrolló un prototipo de Motor Reciprocante Magnético (MRM) monocilíndrico, compuesto por un electroimán y un imán de neodimio. El principio de operación consiste en energizar el electroimán en un ángulo de encendido para generar la fuerza de repulsión necesaria que impulse el movimiento y alcance una velocidad deseada. Posteriormente, el electroimán se apaga en un ángulo de corte para repetir el ciclo de manera continua.

El sistema presenta un comportamiento no lineal debido a la naturaleza magnética y a la posibilidad de obtener la misma velocidad en distintos ángulos, según las condiciones de carga. Para enfrentar esta complejidad se implementó un controlador neuronal. Sin embargo, al aproximarse a los 0° surgieron dificultades en el cálculo de la salida. Como alternativa, se propuso la incorporación de una zona muerta con saturación, con el fin de evitar que la red opere en regiones cercanas a cero y garantizar mayor estabilidad en el control.

Introducción

La velocidad en el MRM depende de dos variables fundamentales, el voltaje de alimentación y el ángulo de energización. En este trabajo se explora la manipulación del ángulo manteniendo el voltaje fijo.
En la tesis de Ríos Enríquez (2024) se desarrolló una estrategia de control neuronal, debido a la relación no lineal del sistema, sobre todo cuando aparece una carga en el motor, ya que se pueden obtener las mismas velocidades a diferentes ángulos. No obstante, esta estrategia presenta limitaciones cuando el cálculo se aproxima a cero grados.
El objetivo principal de este trabajo es proponer una mejora al controlador neuronal existente para garantizar un seguimiento de referencia en todo el rango de operación, incluyendo la región crítica cercana a cero grados.

Metodología

Se desarrolló una Red Neuronal Artificial (RNA) para ser utilizada como controlador, las ecuaciones que representan la RNA son las siguientes:

$$u_{ne}(k) = (Z_1 * y_{b1} + Z_2 * y_{b2} + \theta)$$

Donde:

$$y_{b1} = \tanh(w_{b1}\tanh(ref(k)w_{a1} + \theta) + w_{b2}\tanh(y(k-1)w_{a2} + \theta) + w_{b3}\tanh(u_{ne}(k-1)w_{a3} + \theta_a) + \theta)$$

$$y_{b2} = \tanh(w_{c1}\tanh(ref(k)w_{a1} + \theta) + w_{c2}\tanh(y(k-1)w_{a2} + \theta) + w_{c3}\tanh(u_{ne}(k-1)w_{a3} + \theta_a) + \theta)$$

Y la alternativa de mejora que se propone para evitar la saturación en 0° es:

$$u_{ne}(k) = \begin{cases} -\frac{1}{90}, si & -\frac{1}{90} < u_{ne} < 0 \\ \frac{1}{90}, si & 0 \le u_{ne} < \frac{1}{90} \\ u_{ne} \end{cases}$$

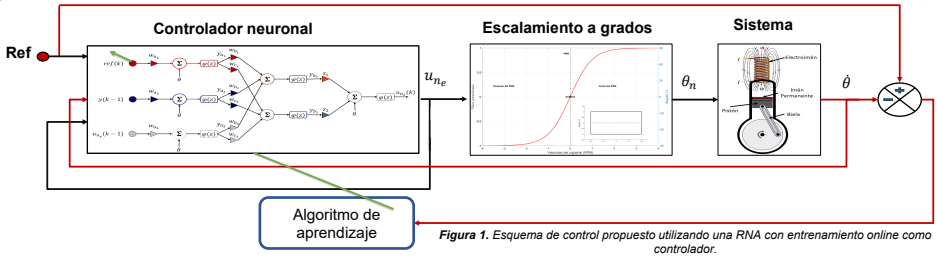


Figura 1. Esquema de control propuesto utilizando una RNA con entrenamiento online como controlador.

Resultados

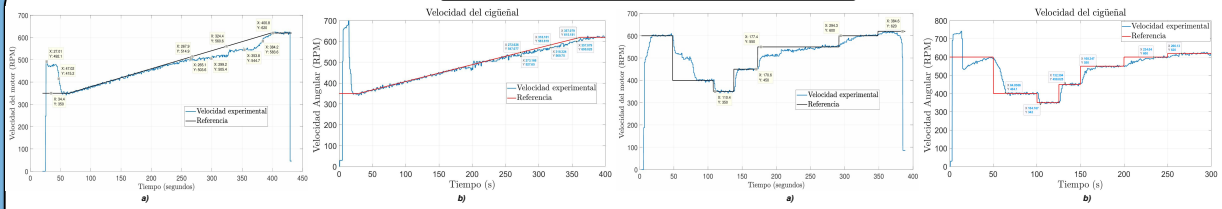


Figura 2. Comportamiento de la velocidad con el control neuronal ante una entrada rampa. a)Original b)Modificado

Figura 3. Comportamiento de la velocidad con el control neuronal modificado ante una entrada escalón. a)Original b)Modificado

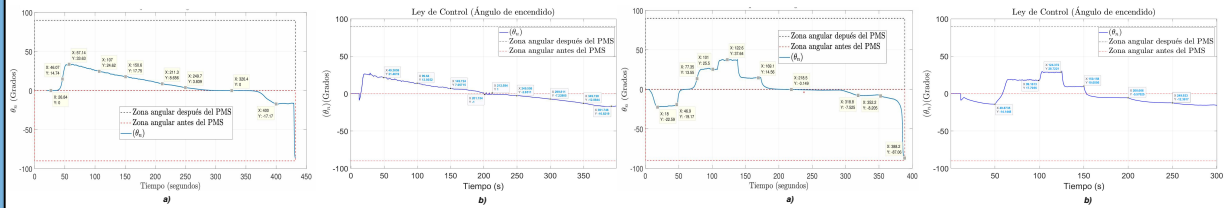


Figura 4. Comportamiento de la ley de control (Ángulos) con el control neuronal ante una entrada rampa. a)Original b)Modificado

Figura 5. Comportamiento de la ley de control (Ángulos) con el control neuronal modificado ante una entrada escalón. a)Original b)Modificado

Nota: PMS es Punto Muerto Superior, es decir cuando el ángulo del cigüeñal es 0°.

Conclusiones

La implementación de la zona muerta presentó una mejora significativa en el seguimiento de la referencia. Su principal desventaja es que, como lo que se está manipulando únicamente es el ángulo de encendido, el voltaje de alimentación proveniente de la fuente se mantiene fijo a 30 VCD, lo que propicia que sea necesario consumir mayor potencia eléctrica para alcanzar diferentes puntos de operación y por tanto obtener bajos porcentajes de eficiencia energética.

Referencias

Dhangar, S., Korane, A., & Barve, D. (2015). Magnetic piston operated engine. Int. J. Adv. Res. Sci. Eng., 4(6), 219-225.
Sundaram, C. S., & Abiraman, M. (2020, July). Magnetic Piston Operated Engine. In 2020 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN) (pp. 1-4). IEEE.
Rios-Enriquez, C., Adam-Medina, M., García-Morales, J., Guerrero-Ramírez, G. V., & Cervantes-Bobadilla, M. (2024). Modeling and Simulation of a Magnetic Reciprocating Engine. IEEE Access.

MINIMIZACIÓN DE LA CAPACITANCIA DEL DC-LINK EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Luis Mauricio Carrillo Santos*, Yesenia Reyes Severiano*, Mario Ponce Silva*, Víctor Hugo Olivares Peregrino
* Tecnológico Nacional de México/CENIDET.

Resumen

Este trabajo presenta una ecuación para el cálculo de la capacitancia mínima del capacitor del circuito de desacoplamiento (DC-link) en sistemas de propulsión de vehículos eléctricos con motor de inducción. La metodología se basa en el análisis del flujo de energía durante la condición crítica de máxima devolución desde el motor hacia el capacitor, identificando los factores proporcionales que determinan la energía almacenada. La reducción de la capacitancia es relevante porque evita el sobredimensionamiento del capacitor, mejora la confiabilidad del convertidor y prolonga la vida útil del sistema. Los resultados demuestran que la ecuación propuesta permite reducir hasta un 62.2 % la capacitancia requerida en comparación con métodos convencionales, manteniendo el desempeño del sistema y ofreciendo un criterio práctico para optimizar el diseño del DC-link en aplicaciones de electromovilidad.

Introducción

La movilidad eléctrica requiere sistemas de propulsión eficientes. Los motores de inducción son una opción robusta y económica, pero presentan un problema clave: el capacitor del DC-link suele sobredimensionarse, utilizando tecnología electrolítica de baja duración que reduce la confiabilidad del sistema [1,2].

Las soluciones actuales agregan filtros que aumentan la complejidad y el costo [3]. Este estudio propone una ecuación matemática innovadora que calcula la capacitancia mínima necesaria analizando el flujo de energía en convertidores de potencia, considerando el caso crítico de máxima devolución de energía, sin requerir circuitos adicionales.

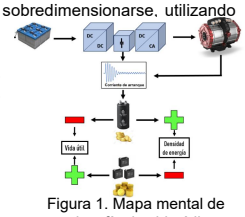


Figura 1. Mapa mental de desafío de vida útil

Metodología

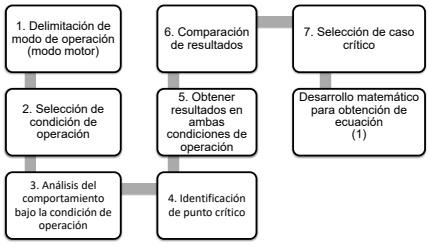


Figura 2. Metodología para la obtención de la nueva ecuación de capacitancia

OBJETIVO GENERAL: Desarrollar una ecuación para el cálculo de la capacitancia mínima del circuito DC-link en sistemas de propulsión de vehículos eléctricos con motor de inducción, mediante el análisis del flujo de energía en convertidores de potencia, considerando el caso crítico de máxima devolución de energía.

Resultados

La validación de la ecuación de capacitancia (1) desarrollada se realizó mediante simulaciones de un sistema con un motor de 3 HP, un inversor trifásico con modulación SPWM (frecuencia de conmutación de 3300 Hz) y una fuente de 320 V.

$$C = \frac{[\Delta t]\left[\frac{K_{dc}P_{nom}}{V_{cd}} - \left(\frac{1}{\Delta t}\right)\left[\frac{-K_4P_{nom}}{V_{cd}}t_4 + \frac{-K_6P_{nom}}{V_{cd}}t_6\right]\right]}{\Delta V_c} \quad (1)$$

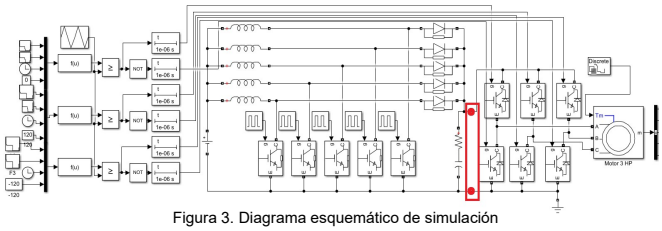


Figura 3. Diagrama esquemático de simulación

Validación experimental

Se confirmó la precisión del modelo con un bajo porcentaje de error entre los valores teóricos y los resultados de la simulación.

- ✓ Error experimental: 3.75% a 6.25%
- ✓ Se evaluaron rizos de voltaje del 3% al 8%, manteniendo la estabilidad del sistema en todos los escenarios

Factores de proporcionalidad óptimos

En estos intervalos ocurre la máxima devolución de energía, se identificaron para el caso de estudio crítico. Los factores de proporcionalidad óptimos obtenidos para el motor de 3 HP fueron:

$K_{DC} = 2.947$
$K_4 = 1.439$
$K_6 = 1.213$

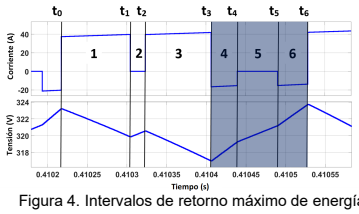


Figura 4. Intervalos de retorno máximo de energía

Reducción significativa de capacitancia

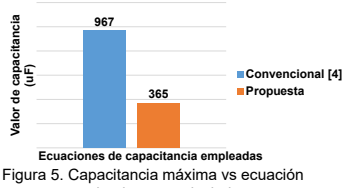


Figura 5. Capacitancia máxima vs ecuación empleada para calcularla

Conclusiones

Este estudio presenta una ecuación para calcular la capacitancia mínima del DC-Link, evitando el sobredimensionamiento en sistemas de propulsión. Basado en el análisis del escenario de mayor retorno de energía, **el modelo reduce la capacitancia requerida hasta en un 62.2% comparado con métodos existentes**. Esta optimización permite el uso de capacitores con tecnologías más fiables y de mayor vida útil, mejorando el rendimiento y la durabilidad del sistema. La metodología es fácilmente escalable, lo que amplía su aplicación a diferentes esquemas de trabajo.

En síntesis, **la ecuación propuesta ofrece un criterio práctico para optimizar el diseño del DC-link, contribuyendo a sistemas de conversión de potencia más compactos, eficientes y confiables.**

Referencias

[1] Jyotheeswara Reddy, K., & Natarajan, S. (2018). Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications – A review. International Journal of Hydrogen Energy, 43(36), 17387-17408. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.076
[2] Langbroek, J. H., Cebecauer, M., Malmsten, J., Franklin, J. P., Susilo, Y. O., & Georén, P. (2019). Electric vehicle rental and electric vehicle adoption. Research in Transportation Economics, 73, 72-82.
[3] Gao, Z., LaClair, T., Ou, S., Huff, S., Wu, G., Hao, P., Barth, M. (2019). Evaluation of electric vehicle component performance over eco-driving cycles. Energy, 172, 823-839.
[4] Butt, O. M., Butt, T. M., Ashfaq, M. H., Talha, M., Raihan, S. R. S., & Hussain, M. M. (2022). Simulative Study to Reduce DC-Link Capacitor of Drive Train for Electric Vehicles. *Energies, 15*(12), 4499.

Sistema de micromedición de agua para viviendas basado en IoT.

Estefanía Gordillo Hernández, Rodolfo Zola García Lozano.
Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Ecatepec.

Resumen

Este estudio aborda el diseño e implementación de un prototipo basado en Internet de las Cosas (IoT) para la monitorización del consumo en redes hidráulicas domésticas, con el fin de promover una gestión sostenible de este recurso esencial. El desarrollo se guió mediante una adaptación de la metodología en espiral, estructurada en fases de análisis de requisitos, desarrollo modular e integración sistémica. La arquitectura implementada incorpora el sensor de caudal YF-S201, el módulo ESP8266 para comunicación WiFi, una base de datos PostgreSQL y una aplicación web desarrollada con el framework Laravel. Los resultados confirman el correcto funcionamiento del prototipo, que captura datos de caudal, los transmite de manera confiable a la infraestructura en la nube (AWS EC2) y permite su visualización, validando así la viabilidad técnica de la propuesta y sentando las bases para su escalamiento futuro.

Introducción

El agua es un recurso vital pero cuantitativamente limitado, donde menos del 1% del total planetario es dulce y directamente accesible (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021). Factores como el incremento del consumo, los efectos del cambio climático y la falta de cultura de cuidado agravan la problemática, destacando que los usuarios generalmente desconocen su consumo real en hogares.

El Internet de las Cosas (IoT) emerge como una solución tecnológica prometedora. Proyectos como el de Rajurkar et al. (2017) en India y Yang et al. (2015) en Europa demuestran que la monitorización en tiempo preciso del consumo de agua permite reducir pérdidas y optimizar su uso, tal como se ha cuantificado en implementaciones en Australasia (Beal & Flynn, 2015).

Por lo tanto, este trabajo aborda esta problemática mediante el diseño e implementación de un prototipo de sistema IoT para la micromedición del consumo de agua en viviendas. El desarrollo, guiado por una metodología en espiral, integra módulo de medición (YF-S201), conectividad (ESP8266), base de datos (PostgreSQL) y visualización (Laravel), validando una arquitectura técnica viable para generar conciencia y promover una gestión sostenible del recurso.

Metodología

Los pasos metodológicos que constituyen este Proyecto y que describe la Fig. 1 son los siguientes:

1. Fase inicial, "análisis de requerimientos y diseño a bloque del sistema" (1).
2. Fase 2. Desarrollo modular. Constituidos por:
   - Módulo de medición de caudal de agua (2).
   - Módulo de conexión WiFi (3).
   - Base de datos principal (4).
   - App. De usuario/Interfaz gráfica (5).
   - Módulo de alimentación (6).
   - Prototipo electromecánico (7).
3. Fase 3. Desarrollo del prototipo (8).
4. Fase 4. Prototipo final y de implementación en sitio (Tramo final).

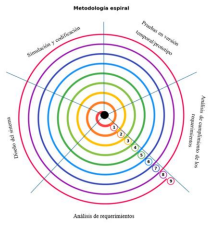


Fig. 1. "Descripción del prototipo mediante el empleo de la metodología espiral".

Resultados

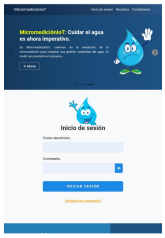


Fig 2. "Visualización pantalla inicio aplicación web"

Fig. 3. "Visualización de datos de prueba"

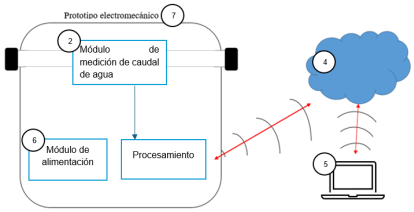


Fig. 4. "Diagrama de arquitectura del sistema"

Conclusiones

Este estudio ha desarrollado con éxito un prototipo funcional de un sistema IoT para la micromedición de agua, constituyendo su principal aportación. La relevancia del trabajo reside en haber validado una arquitectura técnica completa y de bajo coste.

Si bien estudios previos (Rajurkar et al., 2017; Yang et al., 2015) ya demostraron el impacto de la monitorización, este proyecto aporta una implementación accesible y escalable, utilizando tecnologías modernas, cuyos beneficios han sido cuantificados en contextos similares (Beal & Flynn, 2015). La dirección futura inmediata de la investigación, considerando estos resultados, es la fase de implementación en sitio.

Referencias

1. Beal, C. D., & Flynn, J. (2015). Toward the digital water age: Survey and case studies of Australian water utility smart-metering programs. Utilities Policy, *32*, 29-37. https://doi.org/10.1016/j.jup.2014.12.006
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture. https://bit.ly/3DyGB0w
3. Rajurkar, C., Prabaharan, S. R. S., & Muthulakshmi, S. (2017). IoT based water management. En 2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2) (pp. 255-259). https://doi.org/10.1109/ICNETS2.2017.8067943
4. Yang, S., Chen, X., Chen, X., Yang, L., Chao, B., & Cao, J. (2015). A case study of internet of things: A wireless household water consumption monitoring system. En *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 681-686). https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2015.7389136

AI-explainable predictive model to mitigate student dropout at TecNM

MC. Yen Ventura González *, Dr. Vitervo López Caballero **
Centro Nacional de Investigación Y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)

Resumen

La deserción, es un problema global multicausal, que representa un desafío constante para las instituciones e investigaciones debido a su variabilidad a lo largo del tiempo y la brecha exitente entre la teoría y la práctica. El objetivo de esta investigación es el desarrollo de un modelo predictivo, tomando como etapa clave la recolección de datos y utilizando técnicas de XIA, para tener una relación cualitativa y cuantitativa de los factores influyentes.

Se espera que este sistema incremente la retención estudiantil al proporcionar alertas tempranas que permita identificar a estudiantes en riesgo y estrategias personalizadas basadas en datos interpretables para estudiantes del TecNM

Introducción

La deserción escolar es el resultado de un entramado de factores interrelacionados, no de una causa. Modelos clásicos, como el de Tinto (1993), explican el fenómeno desde la integración social y académica; sin embargo, los enfoques tradicionales carecen de interpretabilidad y capacidad predictiva.

Los modelos actuales de Inteligencia Artificial (IA) logran alta precisión, pero suelen actuar como cajas negras.

Ante estas limitantes, esta investigación propone un enfoque basado en IA explicable (XAI), capaz de predecir y explicar los factores que influyen en la deserción dentro del TecNM. En la Figura 1. Se observan los factores influyentes de la deserción estudiantil y en la Figura 2. Se observa una comparacion de los modelos tradicionales y los modelos basados en XAI.

Fig. 1. Factores influyentes en la deserción

Fig. 2.Cuadro comparativo de modelos tradicionales y XAI

Problemática

Diversos estudios han señalado que la deserción escolar en el nivel superior obedece a múltiples factores interrelacionados, incluyendo aspectos académicos, socioeconómicos, psicológicos e institucionales, como se pueden observar en la Figura 3. El Tecnologico Nacional de México no es ajeno a esta problemática, pese a los avances en modelos predictivos, la falta de interpretabilidad y la desarticulación de datos institucionales limitan la acción preventiva . Apesar de contar con registros sobre reprobación, ausentismo y desempeño, estos datos no se aprovechan de forma integrada para prevenir el abandono. Este proyecto propone un enfoque basado en IA explicable para coprender y anticipar los factores asociados al abandono escolar. Por otro lado en la Figura 4. Se observa la metodología con la que se llevará acabo el desarrollo del modelo de predictivo.

Metodología

Fig. 3. Factores del instrumento

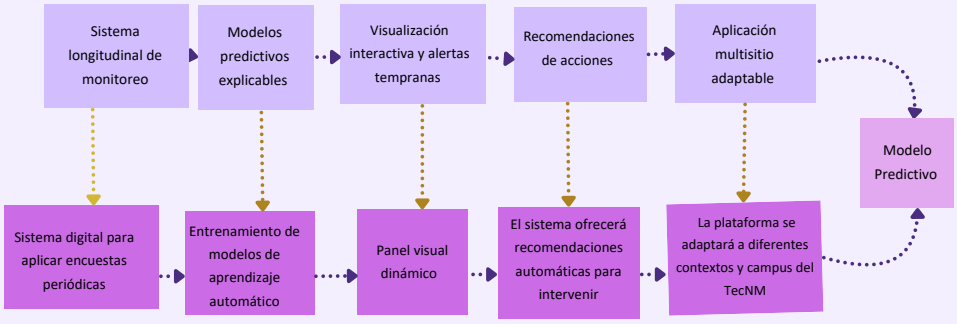


Fig. 4. Metodología de la investigación

Resultados esperados

- Como resultados de esta investigación se espera lo siguiente:
- Identificar los factores claves que contribuyen al abandono de los estudiantes del TecNM.
- Generar alertas automatizadas para docentes o tutores cuando un estudiante muestra señales de riesgo.
- Sugerir acciones personalizadas: tutorías académicas, apoyo psicologico.
- Desarrollar una plataforma adaptable a diversos contextos y campus del TecNM

Conclusiones

La integración de sistemas de monitoreo, visualización temprana y recomendaciones personalizadas fortalece la capacidad institucional para mitigar los riesgos de abandono escolar, orientando acciones específicas alineadas con los diferentes factores que influyen en la deserción.

Referencias

[1] Rabelo, A. M., & Zárate, L. E. (2025). A model for predicting dropout of higher education students. Data Science and Management, 8, 72–85. https://doi.org/10.1016/j.dsm.2024.07.001

[2] Deleña, R. D., Dia, N. J., Sacayan, R. R., Sieras, J. C., Khalid, S. A., Macatotong, A. H. T., & Gulam, S. B. (2025). Predicting student retention: A comparative study of machine learning approach utilizing sociodemographic and academic factors. Systems and Soft Computing, 7, 200352. https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200352

[3] V. Tinto, Leaving College: Rethinking the Causes and Cures of Student Attrition. Second Edition. University of Chicago Press, 5801 South Ellis Avenue, Chicago, IL 60637 ($24, 1993.

CÁLCULO DE LONGITUD DE ONDA UTILIZANDO UNA CÁMARA DE VISIÓN ARTIFICIAL Y EL DISCO DE AIRY.

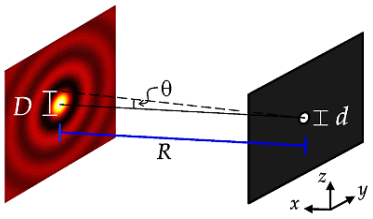
Uriel Rivera-Ortega*,
* Universidad Tecnológica de Puebla.

Resumen

Este estudio introduce una herramienta educativa automatizada y accesible, diseñada para calcular la longitud de onda de un láser mediante el patrón de difracción conocido como disco de Airy, generado al pasar la luz por una abertura circular. La relación entre el tamaño del disco central y la distancia entre la abertura y el plano donde se forma la imagen es bien conocida. Para obtener estos valores, se emplean sensores: uno de visión artificial para medir el diámetro del disco, y otro ultrasónico para calcular la distancia al plano de observación. Este sistema puede utilizarse en clases o laboratorios de Física e Ingeniería, tanto a nivel universitario como de posgrado, con fines pedagógicos, demostrativos o experimentales.

Introducción

Esta propuesta presenta una alternativa automatizada para estimar la longitud de onda de una fuente láser [1,2], basada en el análisis del patrón de difracción generado por una abertura circular. Utiliza sensores de visión artificial (Huskylens) y ultrasónicos para medir, respectivamente, el diámetro del disco de Airy y la distancia entre la abertura y la pantalla de observación. Es fundamental que esta distancia (R) >> (d) para que se forme el patrón de difracción en el régimen de Fraunhofer [3]. En este patrón, la mayor parte de la energía luminosa —alrededor del 84 %— se concentra en el disco central.



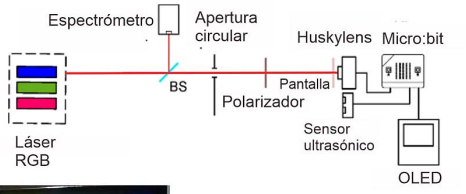
$$D = \frac{2.44\lambda R}{d}$$

$$\lambda = \frac{dr}{1.22R}$$

Figura 1. Difracción creada por apertura circular

Metodología

La configuración experimental, ilustrada en la Figura 2, empleó un módulo láser RGB, una abertura circular de 100 µm y un polarizador para evitar la saturación de la cámara. El diámetro del disco de Airy y la distancia entre la abertura y la pantalla de observación se midieron automáticamente mediante una cámara de visión artificial y un sensor ultrasónico HC-SR04. La adquisición de datos, programación y visualización de resultados se realizaron con una placa micro:bit y una panta



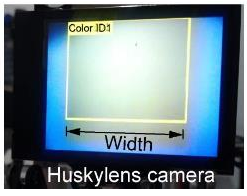


Figura 2. Etapa de calibración

$$0.74\,\text{cm} \rightarrow \text{width(px)}$$

$$x(\text{cm}) \leftarrow 1(\text{px})$$

$$x = \frac{0.74\text{cm} \cdot 1\text{px}}{\text{width(px)}} \approx 0.0038\text{cm}$$

Resultados experimentales

Para evaluar la precisión y la repetibilidad del método, se realizaron 25 mediciones individuales de la longitud de onda utilizando un láser RGB, variando la distancia R entre la abertura circular y el plano de observación. Se tomaron cinco valores de R: 29 cm, 25 cm, 20.5 cm, 16.5 cm y 12.5 cm. El promedio de las mediciones obtenidas en cada caso se consideró como la estimación de la longitud de onda (λ). Los resultados correspondientes se presentan en la Tabla 1 [4].

Tabla 1. Resultados experimentales para diferentes distancias R

R=29 cm	Airy diameter (D)	Estimated wavelength (λ)	Reference wavelength	Error %
Red	0.45 cm	632.83 nm	635 nm	0.34%
Green	0.36 cm	514.84 nm	521 nm	1.18%
Blue	0.33 cm	471.94 nm	476 nm	0.85%

R=25 cm	Airy diameter (D)	Estimated wavelength (λ)	Reference wavelength	Error %
Red	0.38 cm	624.14 nm	635 nm	1.71%
Green	0.31 cm	515.07 nm	521 nm	1.14%
Blue	0.29 cm	490.83 nm	476 nm	3.11%

R=20.5 cm	Airy diameter (D)	Estimated wavelength (λ)	Reference wavelength	Error %
Red	0.31 cm	623.30 nm	635 nm	1.84%
Green	0.26 cm	518.17 nm	521 nm	0.54%
Blue	0.22 cm	443.07 nm	476 nm	6.92%

R=16.5 cm	Airy diameter (D)	Estimated wavelength (λ)	Reference wavelength	Error %
Red	0.25 cm	618.84 nm	635 nm	2.54%
Green	0.22 cm	526.47 nm	521 nm	1.05%
Blue	0.19 cm	471.06 nm	476 nm	1.04%

R=12.5 cm	Airy diameter (D)	Estimated wavelength (λ)	Reference wavelength	Error %
Red	0.19 cm	632.42 nm	635 nm	0.41%
Green	0.16 cm	517.44 nm	521 nm	0.68%
Blue	0.14 cm	471.44 nm	476 nm	0.96%

Resultados experimentales

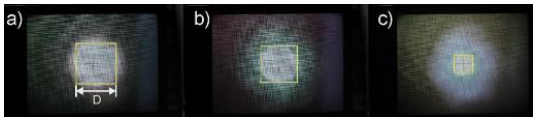


Figura 3. Discos de Airy para tres longitudes de onda: a) 635nm, b) 521nm y c) 476nm.

La principal fuente de errores es debida al cuadrado detectado en la etapa de calibración (Figura 2). Esto es ocasionado por la iluminación no homogénea del entorno, presentando variaciones en el ancho detectado y medido en píxeles.

Conclusiones

Se desarrolló un método automatizado para estimar la longitud de onda de un láser mediante difracción de Fraunhofer, utilizando una cámara de visión artificial como sensor principal. Este enfoque permitió capturar patrones de difracción con alta precisión y bajo costo. Los resultados fueron validados experimentalmente con tres longitudes de onda distintas, demostrando la fiabilidad del sistema.

Referencias

[1]Catunda, T., Sartori, J. and Nunes, L., "Plane wave interference: A didactic experiment to measure the wavelength of light," Am. J. Phys. 66(6), 548-549 (1998). https://doi.org/10.1119/1.18825
[2] Kahane, A., O'Sullivan, M. S., Sanford, N. M. and Stoicheff B. P., "Vernier fringe-counting device for laser wavelength measurements," Rev. Sci. Instrum. 54(9), 1138-1142 (1983). https://doi.org/10.1063/1.1137537
[3] Soskind, Y. G., [Field Guide to Diffractive Optics], SPIE Press, Washington, 14-16 (2011).
[4] Rivera-Ortega U. , "Using a machine vision sensor for wavelength estimation by measuring an Airy disk, with didactic purposes," Phys. Educ. 59, 1-5 (2024). https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad15f2

Clasificación automática de señales EEG epilépticas mediante Máquinas de Vectores de Soporte

Said Azael Durán Contreras*, Raúl De Jesús Gutiérrez Flores*, Valeria Maeda-Gutiérrez*, Luis C. Reveles-Gómez*
*Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas

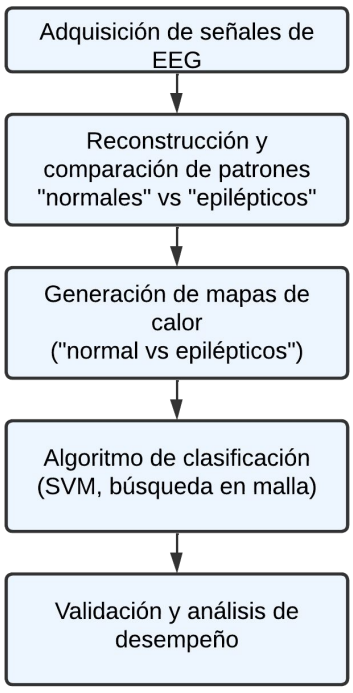
Resumen

La epilepsia es un trastorno neurológico caracterizado por descargas eléctricas anómalas en el cerebro, cuyo diagnóstico oportuno resulta fundamental para la atención clínica. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño de un modelo de aprendizaje automático para la clasificación de señales de electroencefalografía normales y epilépticas. Se utilizó el conjunto de datos *Machine Learning Algorithms for Epileptic Seizures* y se implementó una Máquina de Vectores de Soporte para distinguir entre ambas clases. El modelo alcanzó una precisión del 97.9% y un área bajo la curva de 0.98, evidenciando una alta capacidad discriminativa. Los resultados respaldan el potencial del aprendizaje automático como herramienta para el análisis e interpretación de señales asociadas con episodios epilépticos.

Introducción

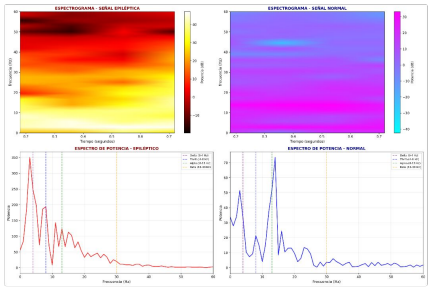
La epilepsia es un trastorno neurológico que afecta a más de 50 millones de personas en el mundo y representa un importante desafío de salud pública (OMS, 2024). Su diagnóstico oportuno y preciso resulta fundamental para el tratamiento clínico adecuado. Sin embargo, el análisis manual de los electroencefalogramas (EEG) suele ser un proceso extenso, complejo y susceptible a errores de interpretación debido al gran volumen de datos y a la variabilidad entre pacientes. En este contexto, las técnicas de aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés) ofrecen herramientas capaces de identificar patrones en las señales cerebrales con alta eficiencia. En el presente trabajo se evaluó un sistema de detección automática basado en Máquina de Vectores de Soporte (SVM, por sus siglas en inglés) para distinguir entre señales EEG normales y epilépticas.

Metodología

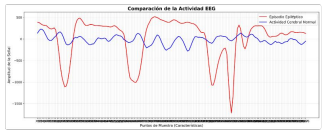


Resultados

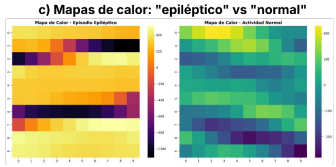
a) EEG



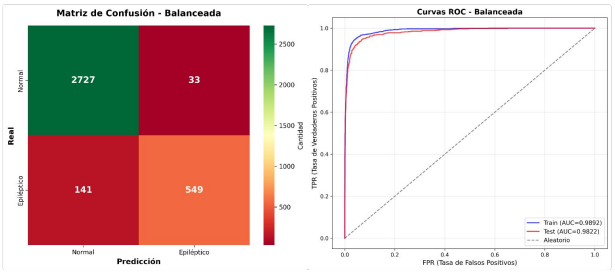
b) Patrones de actividad: "epiléptico" vs "normal"



c) Mapas de calor: "epiléptico" vs "normal"



e) Validación y análisis de desempeño



d) Partición de datos y búsqueda en malla

Conjunto de entrenamiento: 70%
Conjunto de prueba: 30%

Validación cruzada: k=3
Kernel: RBF
Regularización: 1.0
Gamma: 0.01

Entrenamiento:
Sensibilidad: 0.8230 | Especificidad: 0.9891 | AUC: 0.9892 | Puntuación F1: 0.8819

Prueba:
Sensibilidad: 0.7957 | Especificidad: 0.9880 | AUC: 0.9822 | Puntuación F1: 0.8632

Referencias

Organización Mundial de la Salud. (2024). Epilepsia. Organización Mundial de la Salud. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/epilepsy

Harun Shimanto. (2018). Machine Learning Algorithms for Epileptic Seizures [conjunto de datos]. Kaggle. https://www.kaggle.com/code/harunshimanto/machine-learning-algorithms-for-epileptic-seizures/input

Conclusiones

En el presente trabajo se analizó el modelo SVM aplicado a la base de datos Machine Learning Algorithms for Epileptic Seizures de Harun Shimanto, en el que este autor compara el rendimiento de varios modelos en el cual destaca el que utilizamos para la investigación la cual se centra en el uso de este modelo. Se probaron diversas configuraciones de regularización, obteniendo AUC entre 0.9892 y 0.9822 en entrenamiento, 0.9718 y 0.9822 en prueba, y F1 de 0.8819 a 0.8632 en los modelos no lineales. La configuración balanceada logró el mejor rendimiento (AUC = 0.9822, F1 = 0.8632), demostrando un equilibrio óptimo entre ajuste y desempeño. En conclusión, el estudio ofrece un análisis reproducible del efecto de la regularización en SVM y reafirma el potencial clínico del modelo balanceado para la detección automatizada de crisis epilépticas.

Clasificación de los Cinco Grados de Osteoartritis de Rodilla en Radiografías mediante Aprendizaje Profundo

Pedro Emilio Mayorga Ruiz*, Valeria Maeda-Gutiérrez*, Manuel Alejandro Soto Murillo*
*Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas

Resumen

La osteoartritis de rodilla es una de las principales causas de discapacidad en el mundo, afectando la movilidad y calidad de millones de personas. Su diagnóstico radiográfico temprano es un desafío debido a la variabilidad de interpretación clínica. Este estudio desarrolló un modelo de aprendizaje profundo basado en una arquitectura EfficientNet-B3 modificada con módulos CBAM y GridAttention2D, para clasificar los cinco grados de osteoartritis de rodilla en radiografías. El conjunto de datos se dividió en 80% para entrenamiento y 20% para prueba externa, aplicando validación cruzada y técnicas de sobremuestreo con Augmentor. El desempeño se evaluó mediante exactitud, sensibilidad, especificidad y área bajo la curva. El modelo alcanzó una exactitud de 0.66, especificidad y área bajo la curva global de 0.905 y 0.883, respectivamente. En conclusión, el modelo presentó un buen desempeño general, especialmente en grados moderados y avanzados.

Introducción

La osteoartritis (OA) de rodilla constituye una afección crónica y debilitante de origen musculoesquelètico que afecta a más de 300 millones de personas en todo el mundo (OMS, 2023), generando un impacto significativo en la calidad de vida y en los sistemas de salud. Un diagnóstico temprano resulta esencial para delimitar su evolución; sin embargo, los métodos radiográficos tradicionales presentan limitaciones asociadas a la experiencia del médico tratante y a la variabilidad en la interpretación clínica. En este contexto, el aprendizaje profundo y en particular las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés), han mostrado resultados prometedores, reduciendo la variabilidad y mejorando la reproducibilidad diagnóstica. La implementación de modelos de inteligencia artificial (IA) en el diagnóstico de la OA de rodilla no solo optimiza el análisis de las imágenes sino que también contribuye al desarrollo temprano de herramientas de asistencia clínica que favorecen una atención temprana y objetiva.

Metodología

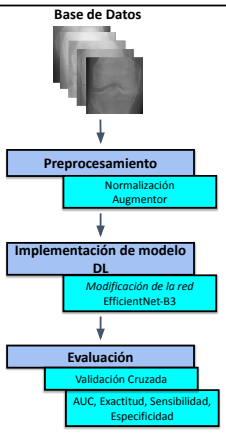


Fig 1. Diagrama de flujo.

Conclusiones

El modelo propuesto, basado en una arquitectura EfficientNet-B3 modificada mediante módulos CBAM y GridAttention2D, demostró un desempeño sólido en la clasificación de OA de rodilla a partir de imágenes radiográficas. Con una sensibilidad de 0.66, especificidad de 0.905 y un área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) de 0.883, el modelo mostró una adecuada capacidad adecuada discriminativa, especialmente en los grados moderados y avanzados. Si bien la sensibilidad limitada en los estadios iniciales refleja el desafío inherente a la detección temprana, el rendimiento general respalda la viabilidad de los modelos de aprendizaje profndo como apoyo a la evaluación radiográfica tradicional. Finalmente, la integración de estas herramientas en entornos clínicos podría favorecer los procesos de diagnóstico y seguimiento, favoreciendo intervenciones más oportunas y personalizadas.

Resultados

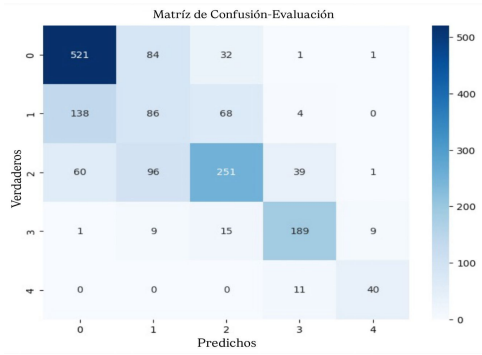


Fig 2. Matriz de confusión del modelo EfficientNet-B3 durante la etapa de evaluación.

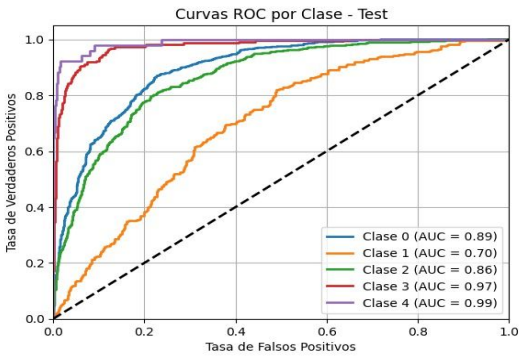


Fig 3.Curvas ROC obtenidas por clase en el conjunto de prueba para el modelo EfficientNet-B3.

El modelo EfficientNet-B3 modificado presentó un desempeño estable en la clasificación de radiografías de rodilla. La Fig 2. muestra una alta concordancia entre las clases reales y predichas, especialmente en los grados moderados y avanzados. En la Fig 3. las curvas ROC evidencian una buena capacidad discriminativa, destacando un mejor rendimiento en los estadios severos de la enfermedad.

Referencias

Chen, P. (2018). Knee osteoarthritis severity grading dataset (Versión 1) [Conjunto de datos]. Mendeley Data. https://doi.org/10.17632/56rmx5bjcr.1.

Organización Mundial de la Salud. (2023). Osteoartritis. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/osteoarthritis.

Construcción Escalable de una Base de Conocimiento de Cáncer de Pulmón: Perfilando el Razonamiento Semántico en LLMs

César Felipe Martínez Cisneros*, Jesús Ulises Quiroz Bautista*, Claudia Anahí Guzmán Solano*, Bogdan Kaleb García Rivera*, Ignacio Arroyo Fernández*

* Universidad Tecnológica de la Mixteca

RESUMEN

La necesidad de calidad semántica en LLMs de oncología se resuelve con un pipeline escalable y de bajo costo (OpenIE + NER) para construir una Base de Conocimiento (KB) de cáncer de pulmón. El fine-tuning resultante demuestra una mejora significativa en ROUGE y BERTScore, validando el método como una solución viable para potenciar el razonamiento semántico.

INTRODUCCIÓN

- LLMs y KBs de calidad.
- Precisión manual vs escalabilidad automatizada.
- KBs y "alucinaciones".
- Enfoque OpenIE.
- Pipeline OpenIE + NER = KB de Cáncer de Pulmón.
- Impacto en el razonamiento semántico de LLMs.

METODOLOGÍA

Adquisición: PubMed Central (PMC)
↓
Filtrado por MeSH (Relevancia)
↓
Filtrado por Licencia (CC0)
↓
Extracción OpenIE de Tripletas
↓
Filtrado (NER) / Dataset Final
↓
Fine-Tuning Semántico T5

RESULTADOS

Proceso de filtrado

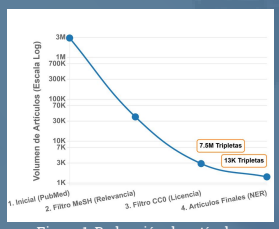


Figura 1. Reducción de artículos

El ajuste fino de modelos T5 con tripletas de conocimiento:

- Mejora de razonamiento en dominio biomédico.
- Genera un aprendizaje efectivo de la terminología específica (~650%) (Figura 2).
- Refina la coherencia semántica (~20%) (Figura 2).
- Convergencia de modelos (T5-base vs. T5-PubMed)
- Calidad sobre cantidad de datos
- Impacto del filtrado de datos
- La curación de datos es clave (Figura 3 y Tabla 1).

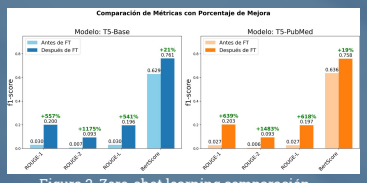


Figura 2. Zero-shot learning comparación ROUGE y F1-Bertsocre de los modelos T5.

Métrica	T5-base		T5-Pubmed	
	Sin filtrar	Filtrado	Sin filtrar	Filtrado
Valor p (pre FT)	0.0049	5.49e-08	0.0085	1.18e-08
Valor p (pos FT)	0.0016	3.01e-19	2.45e-06	1.14e-24
Diferencia del valor p	0.0033	5.49e-08	0.00849755	1.18e-08
Gap pre FT (%)	2.00	4.06	1.96	4.24
Gap post FT (%)	5.15	11.33	5.27	11.34
Incremento del Gap (%)	3.15	7.27	3.31	7.10

Tabla I. Comparación entre modelos con datos filtrados y no filtrados.

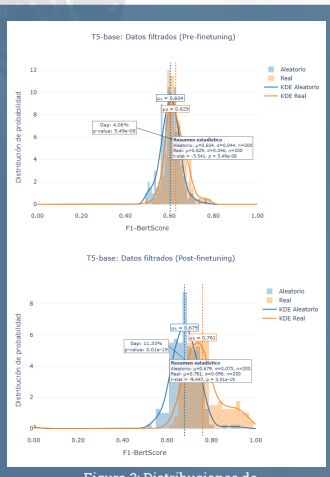


Figura 3: Distribuciones de F1-BERTscore.

CONCLUSIONES

- OpenIE: Recurso eficaz y escalable para el fine-tuning semántico de LLMs médicos.
- Calidad: Filtrado NER; alta calidad supera la cantidad de datos ruidosos.
- Eficiencia: La convergencia de modelos optimiza costes usando LLMs de propósito general.
- Futuro: La investigación se centrará en la supervisión adicional para un razonamiento causal más profundo.

REFERENCIAS

- Min, B., Ross, H., Sulem, E., Pouran Ben Veyseh, A., Nguyen, T. H., Sainz, O., Agirre, E., Heintz, I., and Roth, D. (2023). Recent advances in natural language processing via large pre-trained language models: A survey. ACM Computing Surveys, 56(2), 1-40.
- Xu, Y., Kim, M.-Y., Quinn, K. M., Goebel, R., and Barbosa, D. (2013). Open information extraction with tree kernels. Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, 868-877.

Memorias del 5to Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (5to CITCA 2025)
26 - 28 de Noviembre 2025, Cuernavaca, Morelos

Identification of CRISPR arrays in bacterial genomes using deep learning models

Edna Cruz-Flores [1], Enrique Merino [2], Lorena Díaz-González [3], Blanca Taboada [2]
1. Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, UAEM.
2. Instituto de Biotecnología, UNAM.
3. Centro de Investigación en Ciencias, UAEM.

OBJECTIVE

To develop an integrative approach based on deep learning methods for the annotation of bacteriophage-host bacteria interactions by detecting and extracting interaction signals in CRISPR arrays of bacterial genomes.

INTRODUCTION

Bacteriophages (phages) are considered drivers of the evolution of bacterial communities through the ecological processes of infection that exist or have existed among these microorganisms. Currently, there is no universal strategy, either experimental or computational, established for predicting phage-bacteria interactions. In this work, we develop a methodology that integrates a deep learning (DL) model to identify Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats (CRISPR) found in bacteria and to extract the CRISPR spacers to analyze them as ecological signals for the prediction of phage-bacteria interaction.

METHODOLOGY

Spacers on CRISPR arrays represent a strong interaction signal between the phage and the host bacteria[1].

The direct repeats that separate the spacers tend to be conserved within species and appear as repetitive patterns, making this region susceptible to identification using Deep Learning (DL) models.

Fig. 1. (a) Graphic representation of the CRISPR array region. (b) Representation of the nucleotide sequence of the minimal structure of a CRISPR array.

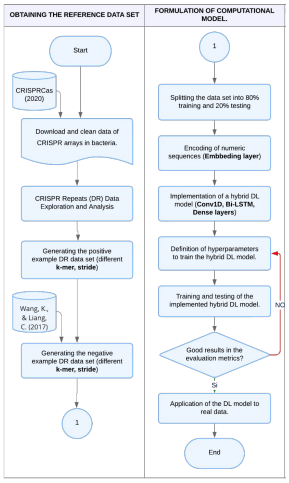


Fig. 2. Proposed methodology.

To optimize model performance, a manual hyperparameter search was performed on a hybrid architecture composed of an embedding layer, one-dimensional convolutional layers, and bidirectional LSTM layers.

Evaluation of combinations of:
- **Embedding**: output dimension (16)
- **Conv1D**: number of filters (32, 64, 128) and kernel size (3, 5, 9)
- **Bi-LSTM**: number of units (32, 64, 128, 256) and depth (1 vs. 2 layers)
- **Dropout**: rates (0.1–0.3)

Table 1. Models with the best results in their evaluation metrics.

Models	Accuracy	Recall	Precision	F1-score	Epocha
M11	0.99096	0.99067	0.99103	0.99085	14
M9	0.98737	0.98678	0.98766	0.98722	16
M7	0.99004	0.98980	0.99006	0.98993	23
M3	0.98607	0.98532	0.98649	0.98591	41
M2	0.98419	0.98368	0.98414	0.98401	50

The evaluation was carried out on 12 genomes in the following stages:

RESULTS

Preliminarily, the results of different models on real data were compared and the model that achieved the highest recall of annotated CRISPR arrays reached accuracy, precision and recall metrics of 0.9841, 0.9841 and 0.9838 respectively, with a Matthews correlation coefficient (MCC) of 0.9741.

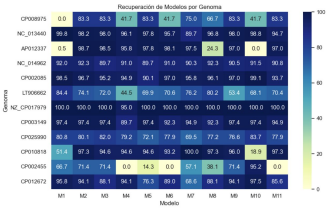


Fig. 3. Recovery percentage of real CRISPR repeats per genome for each trained model.

The development made use of software tools such as Python, TensorFlow, Keras, R, and Perl. Some processes were executed on the MIZTLI supercomputer, a high-performance computing resource of UNAM.

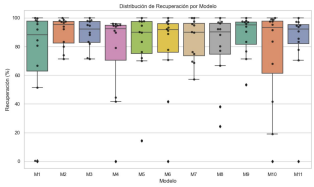


Fig. 4. General distribution of the percentage of recovered CRISPR repeats per model.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

- CNN-LSTM architecture achieved >99% accuracy across all classification metrics.
- Hyperparameter optimization identified optimal configurations with efficient convergence (14-16 epochs).
- Post-processing vulnerability: Fixed-size model outputs create challenges for variable-length reconstruction.
- Optimize post-processing pipeline to reduce data loss.

REFERENCES

1. Nasko, D. J., Ferrell, B. D., Moore, R. M., Bhavsar, J. D., Polson, S. W., & Wommack, K. E. (2019). Crispr spacers indicate preferential matching of specific virioplankton genes. *MBio*, *10*(2). https://doi.org/10.1128/mBio.02651-18
2. Pourcel, C., Touchon, M., Villeriot, N., Vernadet, J. P., Couvin, D., Toffano-Nioche, C., & Vergnaud, G. (2020). CRISPRCasdb a successor of CRISPRdb containing CRISPR arrays and cas genes from complete genome sequences, and tools to download and query lists of repeats and spacers. *Nucleic Acids Research*, *48*(D1), D535–D544. https://doi.org/10.1093/nar/gkz915
3. Ruohan, W., Xianglilan, Z., Jianping, W., & Shuai Cheng, L. I. (2022). DeepHost: phage host prediction with convolutional neural network. *Briefings in Bioinformatics*, *23*(1). https://doi.org/10.1093/BIB/BBAB385
4. Dion, M. B., Plante, P. L., Zufferey, E., Shah, S. A., Corbeil, J., & Moineau, S. (2021). Streamlining CRISPR spacer-based bacterial host predictions to decipher the viral dark matter. *Nucleic Acids Research*, *49*(6), 3127–3138. https://doi.org/10.1093/nar/gkab133

ACKNOWLEDGMENTS

We thank CONAHCYT for the student scholarship of ECF (No. CVU 999728), Jerome Verleyen, Juan Manuel Hurtado y Roberto Bahena from IBt-UNAM for his computational support, and the LANCAD-UNAM-DGTIC-350 project of DGTIC-UNAM for providing supercomputing resources in Miztli.

edna.cruz@ibt.unam.mx @ e.cruz.f @ednacruzfl

creative commons

Inteligencia Artificial Generativa como asistente para la especificación de requisitos en el aula de Ingeniería de Software

Gómez-Álvarez María Clara*, Hernández Castillo Jimena*, Vanegas Vásquez Santiago*

* Universidad Nacional De Colombia. Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión. Medellín Colombia.

Resumen

El propósito de esta investigación es analizar el impacto del uso de un agente de Inteligencia Artificial Generativa (IAG), basado en ChatGPT, denominado "Clarita Review", como herramienta de apoyo pedagógico en la enseñanza de Ingeniería de Requisitos. Se implementó un estudio exploratorio con 84 estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia, en el curso de Ingeniería de Software en el semestre 01-2025. Los resultados evidencian una mejora promedio del 39.77% en la calidad de los artefactos generados (historias de usuario y criterios de aceptación), así como una reducción en los tiempos de entrega y una percepción altamente positiva sobre la utilidad y orientación del agente. Estos hallazgos sugieren que la IAG, utilizada con un enfoque instruccional adecuado, potencia la comprensión conceptual y la productividad de los estudiantes en la especificación de requisitos.

Introducción

La especificación de requisitos es fundamental para el éxito de cualquier proyecto de software, pero es una fase propensa a ambigüedad e inconsistencia. En el aula, los estudiantes de Ingeniería de Software enfrentan dificultades iniciales para producir artefactos de calidad (Historias de Usuario y Criterios de Aceptación), lo que ralentiza el aprendizaje. Si bien la Inteligencia Artificial (IA) ha sido explorada para la mejora de requisitos, la IA Generativa (IAG) presenta tanto nuevas oportunidades de asistencia, como riesgo de sobredependencia cuando no es guiada pedagógicamente. En este contexto, se desarrolla "Clarita Review", un agente de IAG basado en ChatGPT, diseñado para evaluar y guiar la especificación de requisitos mediante los marcos INVEST, SMART y QUS, con el objetivo de analizar cómo la retroalimentación instantánea y formativa del agente mejora la calidad técnica de los artefactos y la asimilación conceptual de los estudiantes, funcionando como un asistente en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Metodología

Se implementó un agente conversacional basado en ChatGPT llamado Clarita Review, diseñado para ofrecer retroalimentación formativa sobre los artefactos producidos por los estudiantes. La investigación se realizó en tres fases:

1. Diseño y configuración del agente, integrando los marcos QUS, SMART e INVEST.
2. Implementación en el aula, donde los estudiantes refinaron el *Product Backlog* de su proyecto de curso con la ayuda del agente.
3. Análisis de resultados, comparando los artefactos iniciales y refinados de 8 equipos, junto con la percepción de los estudiantes.

Para analizar el impacto de la intervención del agente, se estableció una métrica de calidad del *Product Backlog* (PB) con una escala de 0 a 5.0, basada en la adhesión a los principios de Ingeniería de Requisitos INVEST, SMART y QUS.

Resultados

La incorporación del agente "Clarita Review" generó una mejora significativa en la calidad de los artefactos de requisitos elaborados por los estudiantes. La puntuación promedio de los *Product Backlogs* aumentó de 3.25 a 4.5 sobre 5, lo que representa una mejora del 39.77%. Se observó mayor precisión en la redacción de historias de usuario, incremento en la cantidad y calidad de criterios de aceptación, y reducción de ambigüedades y términos técnicos innecesarios. Los estudiantes destacaron la retroalimentación inmediata y el carácter crítico del agente, lo que favoreció la comprensión conceptual y la autonomía. Estos resultados coinciden con hallazgos previos de Mellqvist y Mozelius (2024) y Ma *et al.* (2025), quienes evidencian beneficios similares cuando la Inteligencia Artificial Generativa se integra con un diseño educativo guiado. Además, al revisar las interacciones de los estudiantes con "Clarita Review", los docentes pueden identificar con mayor facilidad los errores y dudas comunes para redirigir su tiempo y esfuerzo para aclarar esos puntos. Como limitaciones, se reconoce que el estudio se realizó en un único curso y durante un periodo de seis semanas, lo que restringe la generalización y evaluación de impacto a largo plazo. Aun así, los resultados sugieren que la IAG, usada como apoyo instruccional, potencia la calidad y eficiencia del aprendizaje en Ingeniería de Requisitos.

Figura 1. Comparación de calidad inicial y final del Product Backlog por equipo.

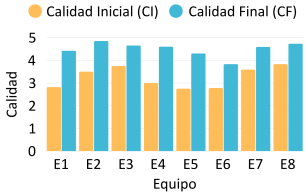


Tabla 1. Códigos de principales defectos (D) en los Product Backlogs iniciales.

D	Defecto	Criterio violado
D1	CAs ausentes o insuficientes	Testeable (INVEST), Completitud (QUS)
D2	CAs ambiguos o no verificables	Specific/Measurable (SMART), Testeable (INVEST)
D3	HU que incluye múltiples funcionalidades	Small / Independent (INVEST)
D4	Falta de roles/actor o actor no identificado	Valuable/Clarity (QUS, INVEST)
D5	Beneficio poco claro o uso de jerga técnica	Specific / Valuable (SMART / QUS)
D6	Falta de escenarios negativos / validaciones	Completitud (QUS) / Testeable (INVEST)
D7	Estructura de HU/ CAs en formato inconsistente	Claro (QUS) / Estructura

Matriz 1. Defectos (D) corregidos por tipo de mejora (M) aplicada.

M \ D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
M1	✓					✓	
M2		✓					✓
M3			✓				
M4					✓		
M5		✓			✓		
M6				✓			
M7		✓				✓	
M8	✓					✓	
M9			✓				✓
M10						✓	

Tabla 2. Códigos de principales mejoras (M) del agente en los Product Backlog finales.

M	Acción del agente
M1	Generación de CAs completos por HU.
M2	Reformulación de CAs y HUs a formatos estándar.
M3	División de HUs multifuncionales en historias atómicas.
M4	Clarificación de Valor y Beneficio.
M5	Estandarización Terminológica entre HUs y CAs.
M6	Incorporación de roles/actores ausentes.
M7	Inclusión de Métricas Medibles en CAs.
M8	Validación Cruzada HU–CAs.
M9	Eliminación de Redundancia y Solapamiento entre HUs.
M10	Cobertura de Escenarios Negativos o alternativos.

Conclusiones

El agente "Clarita Review" demostró un impacto directo en la calidad técnica de los artefactos de requisitos y la productividad de los estudiantes, logrando una mejora significativa tras una sola intervención. La retroalimentación formativa y guiada facilitó una asimilación más profunda y rápida de conceptos (INVEST, SMART, QUS). Estos hallazgos validan el valor de la Prompt Engineering orientada a requisitos (ROPE) en contextos educativos (Ma *et al.*, 2025), demostrando que la IAG no solo mejora la eficiencia (Mellqvist y Mozelius, 2024), sino que también fortalece la construcción de habilidades críticas. Se proponen trabajos futuros que amplíen la muestra, comparen distintos modelos de lenguaje y evalúen el impacto a largo plazo de este tipo de agentes.

Referencias

Cheng, H., Husen, J. H., Peralta, S. R., Jiang, B., Yoshioka, N., Ubayashi, N., & Washizaki, H. (2024). Generative AI for requirements engineering: A systematic literature review. arXiv. Cornell University. https://doi.org/10.48550/arxiv.2409.06741

Ma, Q., Peng, W., Yang, C., Shen, H., Koedinger, K., & Wu, T. (2025). What should we engineer in prompts? Training humans in requirement-driven LLM use. ACM Transactions on Computer-Human Interaction. https://doi.org/10.1145/3731756

Mellqvist, N., & Mozelius, P. (2024). Exploring student perspectives on generative AI in requirements engineering education. In Proceedings of the 4th International Conference on AI Research (ICAIR 2024). https://doi.org/10.34190/icair.4.1.3136

Santos, A., Laranjeira, D., & Lima, M. (2025). User stories: Does ChatGPT do it better? In Proceedings of the 2025 International Conference on Software Engineering.

Pruebas Funcionales Asistidas por IA: Diseño y Automatización con LLMs.

Maria Clara Gómez-Álvarez, Valentina Ospina Narvaez , Santiago Varela Vanegas.
Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Resumen

La calidad del software depende de pruebas funcionales robustas, que cubren escenarios esperados y excepcionales. Sin embargo, la creación manual de estos casos en sistemas complejos es lenta y laboriosa, limitando la cobertura de pruebas. Actualmente, los equipos de QA dedican considerable tiempo a analizar requisitos y documentar escenarios detallados, incluyendo condiciones de entrada, pasos, datos de prueba y resultados esperados. Este estudio propone una solución basada en inteligencia artificial generativa para automatizar la creación de casos de prueba funcionales y la generación de scripts de automatización. Se exploran y evalúan modelos de lenguaje avanzados (GPT-4, Gemini, Claude, DeepSeek) para determinar su capacidad de producir pruebas estructuradas y precisas, alineadas con marcos como Gherkin y herramientas como Selenium, Cypress o Playwright.

Introducción

En el desarrollo de software, la calidad del producto es esencial para garantizar la satisfacción del usuario, la eficiencia operativa y la reputación organizacional. Esta calidad depende de pruebas funcionales exhaustivas que validen el cumplimiento de los requisitos. Sin embargo, la creación manual de casos de prueba resulta lenta, demanda esfuerzo y puede generar errores o baja cobertura. Aunque la automatización acelera el proceso, los scripts requieren mantenimiento y no contemplan todos los escenarios (Baqar & Khanda, 2024). Frente a ello, la inteligencia artificial generativa surge como una solución innovadora que automatiza la generación de pruebas, mejora la eficiencia, reduce errores, detecta fallos tempranos y refuerza la confiabilidad del software, beneficiando al aseguramiento de calidad.

Metodología

Diseño de prompts y exploración

Verificación de modelos actuales de LLM y sus capacidades para generar casos de prueba seguido de un diseño inicial de prompts para su generación

Prueba piloto

Se realizó una evaluación de la efectividad de los casos generados; y un análisis empírico contra enfoques tradicionales y automatizados.

Análisis de resultados

Los resultados preliminares demuestran que la automatización asistida por IA mejora significativamente la eficiencia del proceso de validación, al generar una base robusta de casos de prueba que pueden ser refinados para optimizar la calidad y cobertura.

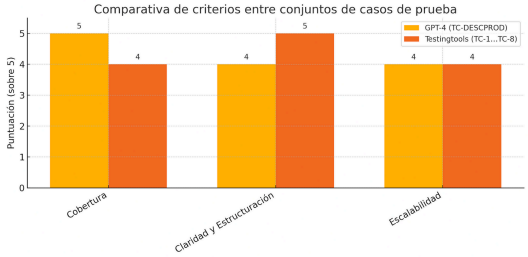
Resultados

En una primera etapa, mediante la aplicación de técnicas de pruebas de caja negra, se observó que la cantidad de casos de prueba generados fue mayor, aportando una mayor profundidad de validación, fortaleciendo la robustez del sistema y aumentando la detección de errores relacionados con validaciones y entradas.

Por otro lado, al emplear modelos de lenguaje (LLMs) para la generación automática de casos de prueba, se identificó que estos tienden a producir casos más orientados a los flujos principales del sistema y a la verificación de la lógica del negocio, priorizando la cobertura funcional esencial.

Ambos enfoques presentan perspectivas complementarias: mientras las técnicas tradicionales garantizan exhaustividad y detección de excepciones, los LLMs aportan eficiencia y orientación semántica.

Tabla comparativa (GPT-4) vs Testingtools



El análisis realizado valida la generación de casos de prueba de GPT-4 y Testingtools para validar la cobertura, claridad y estructura en la generación de casos de prueba.

GPT-4 logra mayor cobertura, incluyendo escenarios alternativos y de error, mientras que Testingtools destaca por su claridad y estructura. En escalabilidad, ambos enfoques presentan resultados similares.

Estos hallazgos demuestran que la integración de modelos generativos mejora la calidad del diseño de pruebas, equilibrando precisión técnica y eficiencia en la validación del software.

Conclusiones

- La combinación de casos de prueba manuales con aquellos generados mediante inteligencia artificial se perfila como una estrategia óptima para acelerar el proceso de validación y garantizar una evaluación integral de la calidad del software.
- Considerando factores como precio, calidad, estructura, detalle y utilidad, GPT-4 es la mejor opción para generar casos de prueba con IA, ya que facilita la automatización y permite crearlos a partir de diversas entradas, como historias de usuario, requisitos funcionales o imágenes de las funcionalidades.
- Como siguiente paso, se plantea aplicar la generación de casos de prueba con inteligencia artificial en proyectos reales para comparar su desempeño con los métodos tradicionales, evaluando su eficacia, precisión y aporte a la mejora de la calidad del software.

Referencias

- Baqar, M., & Khanda, R. (2024, Septiembre). The future of software testing: AI-Powered Test case generation and Validation.
- Rojas Salazar, C. A. (2025). IMPLEMENTACIÓN DE MODELO PARA LA GENERACIÓN DE CASOS DE PRUEBA y EJECUCIÓN a PARTIR DE ESPECIFICACIONES OPENAPI USANDO MODELOS DE LENGUAJE NATURAL (By Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito & Decanatura de Ingeniería de Sistemas).
- Mishra, A. & Veer Madho Singh Bhandari Uttarakhand Technical University, Dehradun. (2024). Generative AI in Automated Software Testing: A Comparative study. In International Journal of Science and Technology (IJST) (Vol. 2, Issue 1).

Memorias del 5to Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (5to CITCA 2025)
26 - 28 de Noviembre 2025, Cuernavaca, Morelos

VirDetect-AI: New artificial intelligence tool for identifying eukaryotic viral proteins in metagenomic data

Alida Esmeralda Zárate Jiménez[1], Blanca Itzelt Taboada Ramírez[1] , Lorena Díaz González[2]
[1] Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
[2] Centro de Investigación en Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM

Objetive

Development of a deep learning model to identify and classify known viral sequences from metagenomic data, and to detect potential novel viruses not recognizable by conventional annotation methods due to gaps in viral protein databases.

Introduction

Viruses are obligate intracellular parasites, as they require a host cell to reproduce. There are viruses that infect prokaryotic cells (e.g., bacteriophages) and others that infect eukaryotic cells (Figure 1). This research focuses specifically on eukaryotic viruses. Viral metagenomics is the direct sequencing and analysis of all viral genetic material present in a sample through bioinformatics pipelines is used to identify known viruses and discover novel ones circulating in diverse environments (Figure 2).

Identifying eukaryotic viruses in metagenomic data remains a challenge due to their high diversity and low similarity to known reference sequences. Traditional alignment- or profile-based methods are often insufficient to handle the volume and complexity of these datasets. VirDetect-AI is an artificial intelligence-based tool that classifies viral proteins using deep neural networks trained on millions of viral protein k-mers (subsequences), with models reaching over 27 million parameters (Zarate, 2025).

This approach enhances the sensitivity and specificity of viral classification, enabling the detection of previously uncharacterized viral families and demonstrating the potential of supercomputing for advanced genomic research.

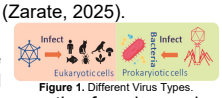


Figure 1. Different Virus Types.

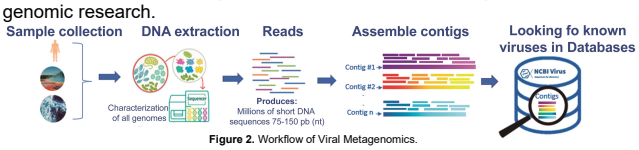


Figure 2. Workflow of Viral Metagenomics.

Methodology

The VirDetect-AI workflow begins with the download and curation of viral proteins from NCBI, clustered into 980 functional classes using CD-HIT.

A total of 1,027,747 amino acid sequences were fragmented generating 19 million k-mers divided into, training validation, and test sets. A ResNet-based CNN was trained on GPU infrastructure provided by the Miztli supercomputer (LeCun et al., 2015; He et al., 2016). (Figure 3).

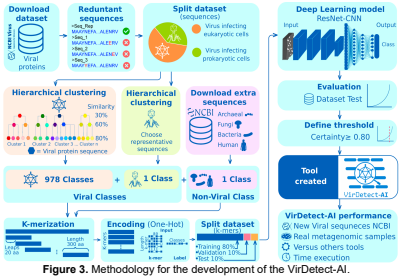


Figure 3. Methodology for the development of the VirDetect-AI.

To evaluate performance, we used real metagenomic data from oropharyngeal (Iša et al., 2022) and infant fecal samples (Rivera-Gutiérrez et al., 2023), along with novel viral proteins from NCBI (NCBI-EukVirusP-set). For comparison with VirSorter2 and DeepVirFinder, VirDetect-AI was evaluated using the NCBI-EukVirusN-set (eukaryotic) and NCBI-CaudoN-set (prokaryotic) (Table 1).

Table 1. Information of datasets evaluated.

Dataset	Type	# Seqs	Origin
NCBI-EukVirusN-set	Nucleotides	4260	Virus NCBI database
NCBI-CaudoN-set	Nucleotides	420	Virus NCBI database
NCBI-EukVirusP-set	Amino acids	36660	Virus NCBI database
Meta-EukVirus-set	Amino acids	703	Metagenomic from 120 Oropharyngeal samples
Meta-Unknown-set	Amino acids	113	Metagenomic from 120 Oropharyngeal samples
Meta-Human-set	Amino acids	1280	Metagenomic from two Oropharyngeal samples
Meta-Bacteria-set	Amino acids	2426	Metagenomic from a single infant fecal sample

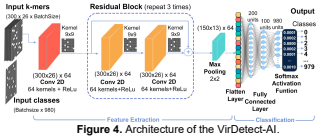


Figure 4. Architecture of the VirDetect-AI.

Results

VirDetect-AI demonstrated strong performance during training and real-world application. It achieved high accuracy and significantly outperformed traditional tools in inference speed, while also detecting a broader range of viral diversity including unknown sequences not found in current databases.

- **Model training:** Accuracy 99% and loss: 0.02
- **Inference speed:** Up to 4,200× faster than Blastp (GPU) and up to 33× faster than Blastp (CPU).
- **Overall class sensitivity:** 94.4% of the classes (n = 980) achieved a sensitivity greater than 0.9, while only 1.3% of the classes (n = 13) showed sensitivities below 0.7.

Datasets:

♦ Meta-*: Showed strong performance on real data, detecting novel viruses and matching published findings (Figure 5).

♦ NCBI-EukVirusP-set: 73.8% classified as viral, including sequences from 43 new families, demonstrating strong generalization.

♦ Tool Comparison: VirDetect-AI showed the highest sensitivity for eukaryotic viruses (87.7%) and ranked second for prokaryotic (93%), just behind VirSorter2 (95%).

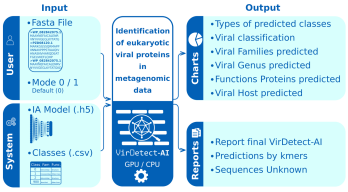


Figure 6. VirDetect-AI prediction process.

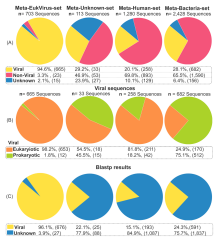


Figure 5. Classification results for real metagenomic datasets (Meta-*)

Conclusions

VirDetect-AI is a robust artificial intelligence tool for the identification of eukaryotic viral proteins in metagenomic data, capable of detecting viral proteins even when they show no detectable similarity to previously characterized sequences. VirDetect-AI was successfully trained to efficiently classify 980 classes of viral proteins with high sensitivity. The model demonstrated strong performance across these classes and outperformed existing tools in the identification of both eukaryotic and prokaryotic viral proteins. Additionally, it enabled the discovery of novel viral families, supporting its application in epidemiological surveillance and emerging virus detection. Figure 6 illustrates the architecture of the VirDetect-AI tool. All project resources are openly available: the source code is hosted on GitHub (github.com/alyzart22/VirDetect-AI), and the trained models and sequences are available on Zenodo (doi.org/10.5281/zenodo.10693841).

Contact Information
Alida Esmeralda Zárate Jiménez
alida.zarate@ibt.unam.mx

Curious?
Scan to discover our research

Acknowledgements

The scholarship granted by CONAHCYT. Additionally, we express gratitude for the computational resources provided by the MIZTLI supercomputer, facilitated by the National University of Mexico's General Directorate of Computing and Information and Communication Technologies (DGTIC) through project LANCAD-UNAM-DGTIC-350. This work was funded by the projects SECTEI/138/2024 (to Zárate, S) from SECTEI-CDMX, CBF-2025-I-1026 from SECIHTI (to Taboada, B), and PAPIIT-DGAPA-IN230523 from DGAPA-UNAM (to Taboada, B). Finally, we extend our thanks to Jerome Verleyen, Juan Manuel Hurtado, and Roberto Bahena, from the Instituto de Biotecnología of UNAM for their invaluable computing support.

References

Zárate, A., Díaz-González, L., & Taboada, B. (2025). VirDetect-AI: A residual and convolutional neural network–based metagenomic tool for eukaryotic viral protein identification. Briefings in Bioinformatics, 26(1).
LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539
He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR) (pp. 770–778).
Iša, P., Taboada, B., García-López, R., et al. (2022). Metagenomic analysis reveals differences in the co-occurrence and abundance of viral species in SARS-CoV-2 patients with different severity of disease. BMC Infectious Diseases, 22, Article 1000.

Visión Artificial para Control de Brazo Robótico

Mario Adán Pérez Frías*, Said Azael Durán Contreras*, Valeria Maeda-Gutiérrez*
*Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas

Resumen

Este proyecto aborda la necesidad de contar con sistemas accesibles para el entrenamiento en cirugía robótica, donde los simuladores comerciales suelen ser costosos y de configuración compleja. Se presenta el desarrollo de un sistema de software para el control en tiempo real de un brazo robótico mediante visión artificial, concebido como una herramienta de entrenamiento para aplicaciones de telemedicina. El sistema utiliza la biblioteca de MediaPipe en Python para detectar y rastrear 21 puntos de referencia clave en la mano del usuario a través de una cámara web estándar. A partir de estos puntos, se calculan los ángulos de flexión de los dedos y la rotación de la muñeca, que son procesados con un filtro de suavizado y mapeados al rango operativo de los servomotores. Finalmente, los comandos se transmiten vía comunicación serial a una placa Arduino, replicando con fidelidad los gestos del operador. Este enfoque busca mejorar la precisión y repetitividad del movimiento del brazo robótico, ofreciendo una alternativa intuitiva y de bajo costo para la capacitación médica asistida por visión artificial.

Introducción

El entrenamiento en cirugía robótica se ve limitado por el alto costo y la complejidad de los sistemas de control disponibles [1], que exigen una capacitación extensa debido a sus curvas de aprendizaje. Para superar estas limitaciones, se desarrolló una alternativa accesible y basada en visión artificial. El sistema propuesto emplea una cámara web estándar y la biblioteca MediaPipe [2] para rastrear los gestos de la mano, traduciéndolos en comandos para el control de un brazo robótico. El objetivo es ofrecer una herramienta de entrenamiento intuitiva que facilite el desarrollo de habilidades médicas y la práctica de telemedicina.

Metodología

El sistema utiliza Python con OpenCV [3] para la captura de video y la biblioteca MediaPipe para el seguimiento de 21 puntos clave de la mano en tiempo real. A partir de las coordenadas de estos puntos, se calculan los ángulos de flexión de los dedos y la rotación de la muñeca mediante análisis vectorial. Los valores angulares son suavizados con un filtro digital y mapeados al rango operativo de los servomotores. Finalmente, los comandos se envían por comunicación serial a una placa Arduino, que controla un driver PCA9685 [4] para accionar los servomotores del brazo robótico.

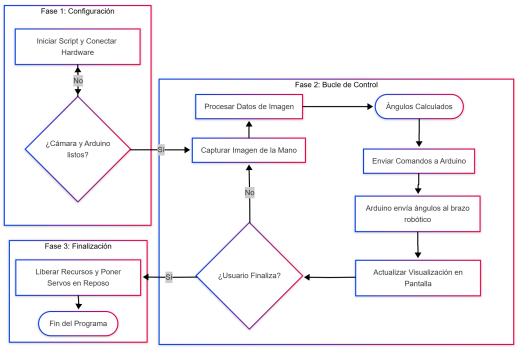


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema.

Resultados

El sistema implementado demuestra la capacidad de controlar un brazo robótico en tiempo real con baja latencia, traduciendo exitosamente los gestos de la mano capturados por la cámara web. El software calcula de forma robusta los ángulos de flexión de los cinco dedos y la rotación de la muñeca, logrando un mapeo funcional entre el movimiento humano y la actuación robótica. El uso de un filtro de suavizado y un umbral de cambio fue crucial para eliminar el ruido y generar un movimiento mecánico estable y predecible. Aunque el rendimiento es óptimo en condiciones de buena iluminación, se identifica la necesidad de una calibración inicial para adaptarse a diferentes usuarios.

a) Mano cerrada b) Signo de paz c) Mano abierta d) Brazo robótico

Figura 2. Detección de diferentes posiciones de manos y brazo robótico.

T: Pulgar (Thumb)
I: Índice (Index)
M: Medio (Middle)
R: Anular (Ring)
P: Meñique (Pinky)
W: Muñeca (Wrist)
Inx / Thb: Ángulo de flexión calculado para el dedo correspondiente
Wrist RawAng: Ángulo sin procesar de la muñeca
S: Valor del ángulo suavizado
Sv / Servos: Valor final del ángulo (0-180°) enviado a cada servomotor

Conclusiones

Se desarrolló exitosamente un sistema de software que controla un brazo robótico mediante gestos de la mano, validando el uso de MediaPipe para crear interfaces de control intuitivas y de bajo consto.

El proyecto demuestra que es posible replicar movimientos complejos sin hardware especializado, lo que democratiza el acceso a la formación en telemedicina. Este trabajo sienta las bases para futuras mejoras, como la integración de retroalimentación háptica y la validación con usuarios finales, consolidando su potencial como una herramienta de entrenamiento eficaz.

Referencias

[1] Surgical Science, “All Products Gallery,” *Surgical Science*. [Online]. Available: https://surgicalscience.com/simulators/all-products-gallery/.

[2] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, A. Tkachenka, G. Sung, C.-L. Chang, and M. Grundmann, “MediaPipe Hands: On-device real-time hand tracking,” arXiv preprint arXiv:2006.10214, 2020.

[3] G. Bradski, “The OpenCV library,” Dr. Dobb’s Journal of Software Tools, vol. 25, no. 11, pp. 120–123, 2000.

[4] NXP Semiconductors, “PCA9685: 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller,” Datasheet, Rev. 7, Dec. 16, 2021. [Online]. Available: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf.

Avances en el Desarrollo de Fármaco Regulador de la Hormona Resistina, y su Posible Efecto en Cáncer de Próstata.

María Jose Oros Soto *, Ana Brenda Ortega Morales * y Jose Luis Vique Sanchez.*
* Facultad de Medicina y Nutrición, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, C.P. 21000, México.

Resumen

La pandemia de COVID-19 incremento factores de riesgo relacionados a la nutrición en la población, en donde el sobrepeso y la obesidad contribuyen en el desarrollo de enfermedades crónicas y varios tipos de cáncer. Esto demuestra que es necesario atender factores de riesgo que se generan a consecuencia de el sobrepeso y obesidad, en donde el aumento de tejido adiposo esta relacionado a mayor liberación de adipocinas, así como un aumento de citocinas proinflamatorias; y esto contribuye a generar factores que promueven el aumento de factores relacionados para el desarrollo de algunos tipos de cáncer. Por lo que necesario el desarrollo de fármacos que puedan regular a estas adipocinas; como lo es la resistina, la cual es utilizada en este proyecto como blanco terapéutico para desarrollar un nuevo fármaco. En este poster se presentan resultados preliminares de este proyecto, el desarrollo de un fármaco regulador de la resistina mediante ensayos in vitro.

Introducción

Actualmente, factores sociales y la pandemia han contribuido en hacer notar factores de riesgo relacionados a la nutrición de la población, ya que el peso corporal; el tejido adiposo contribuye en el desarrollo de enfermedades crónico degenerativas e incluso cáncer. Pero es claro que los problemas de sobrepeso y obesidad continuarán durante los próximos años, lo que hace necesario incrementar los esfuerzos para atender factores de riesgo que se generan a consecuencia de el sobrepeso y obesidad, en donde el aumento de tejido adiposo esta relacionado a mayor liberación de la hormona Resistina, esta es una adipocina relacionada a incrementar el peso corporal, contribuir en el desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas, promover desarrollo el de varios tipos de cáncer, entre otras (Chen et al., 2012) (Chi & Vargas, 2020).

Este proyecto tiene el objetivo de desarrollar un fármaco regulador de la resistina; el cual ya tiene avances reportados en la regulación de mensajeros relacionas a las funciones de la resistina, y su posible uso terapéutico (Rivera-Suárez, 2025).

Metodología

Cultivo celular.

Las células de cáncer de próstata PC3 (ATCC) y hepatocitos se cultivaron en placas de Petri de 100 mm con medio de cultivo DMEM (Dulbecco's Modified Eagle's Medium) suplementado con 3,7 g/L de bicarbonato de sodio, 5% (PC3) y 10% (hepatocitos) de suero fetal bovino (FBS) y antibióticos, en una atmósfera con humedad controlada, 5% de CO2 y 95% de aire, a 37 °C, realizando el ensayo MTT con los hepatocitos siguiendo la metodología reportada (Mosmann, 1983) a 400 µM.

Ensayo de migración celular mediante lesión por raspado.

Las células PC3 se estimularon con los compuestos R1-R10 y DMSO para evaluar el efecto inhibidor en la migración celular mediante el ensayo de lesión por raspado. Posteriormente, se trataron con mitomicina C a una concentración de 12 µM (Santa Cruz Biotechnology, EE. UU.) durante 2 h para inhibir la proliferación celular. A continuación, se realizó una lesión por raspado en el cultivo celular. Las células se estimularon durante 48 h con los compuestos R1-R10 a una concentración de 100 µM en DMEM con 5% de FBS. De esta manera, se evaluó la migración celular hacia la zona de la lesión al final del experimento (48 h).

Resultados

Los avances de resultados demostraron que los compuestos R2 y R6 (Figura 1) tienen un mayor efecto anti-migratorio en las células PC3 (Figura 2) determinado en el ensayo de cierre de herida 48 h. De estos 2 compuestos se realizaron los ensayos de citotoxicidad mediante la prueba de MTT, en donde los resultados fueron favorables para los compuestos R2 y R6 en los cultivos de hepatocitos a las 48 h. No se observó algún efecto citotóxico, ya que se determinó un resultado similar entre las concentraciones utilizadas de la molécula R2 y R6 (hasta 400 µM), y los controles de cada tipo celular.

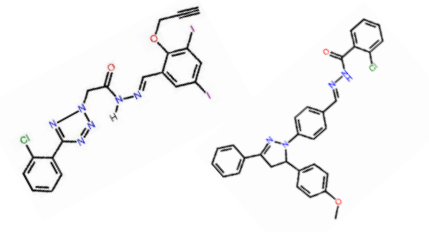


Figura 1. Estructuras químicas de compuestos R2 y R6.

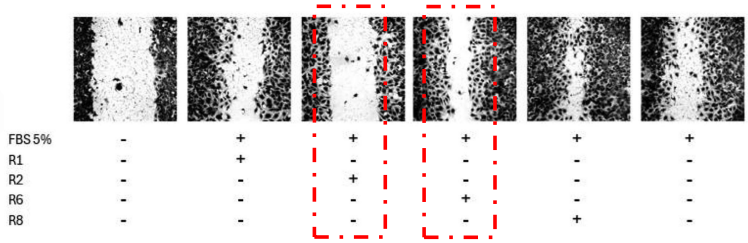


Figura 2. Resultados del ensayo de migración en cultivos de células PC3 (prueba de migración en herida artificial) tras 48 horas de tratamiento con 100 µM de cada compuesto. El compuesto R2 y R6 mostraron el mayor efecto.

Conclusiones

Los resultados preliminares muestran un efecto anti-migratorio de los compuestos R2 y R6 en los cultivos de las células PC3 (Figura 2). Además, se evaluó la citotoxicidad de estos 2 compuestos en cultivos de hepatocitos mediante la prueba de MTT, y no se determino algún efecto citotóxico

Estos resultados están relacionados a la selectividad que se podrían tener estos 2 compuestos con la resistina, y generar una disminución en las principales funciones conocidas de la resistina en cáncer de próstata, y su efecto en la migración.

Por lo tanto, proponemos la continuación del desarrollo de este compuesto como un fármaco contra la resistina, para tener una opción terapéutica para atender las enfermedades donde la resistina tiene funciones.

Referencias

Chen, H., Sun, Y., Wu, C., Magyar, C. E., Li, X., Cheng, L., Yao, J. L., Shen, S., Osunkoya, A. O., Liang, C., & Huang, J. (2012). Pathogenesis of prostatic small cell carcinoma involves the inactivation of the P53 pathway. Endocrine-related cancer, 19(3), 321–331. https://doi.org/10.1530/ERC-11-0368

Chi, L. A. & Vargas, M. C. (2020). In silico design of peptides as potential ligands to resistin. Journal of Molecular Modeling, 26(5), 101. https://doi.org/10.1007/s00894-020-4338-3

Rivera-Suárez, B. A., García González, V. G., Chimal-Vega, B., Navarro Padrón, A. C., Galindo-Hernández, O. & Vique-Sánchez, J. L. (2025). Potential Ligands to Resistin Against Prostate Cancer, Evaluated by Molecular Docking and In Vitro Assays to Develop an Anticancer Drug. Chemistry & Biodiversity. https://doi.org/10.1002/cbdv.202500189

Mosmann T. (1983), Rapid Colorimetric Assay for Cellular Growth and Survival: Application to Proliferation and Cytotoxicity Assays, Journal of Immunological Methods 65: 55–63

The Viral Pangenome

Oscar Alejandro Uscanga Junco*, Dra. Lorena Díaz González**, Dra. Claudia Selene Zárate Guerra***, Dra. Blanca Itzelt Taboada Ramirez****
IICBA-UAEM *, CINC-UAEM**, UACM***, IBT-UNAM****

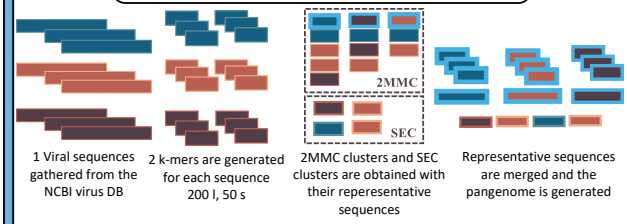
Abstract

Viral species annotation is often limited by reference database size and computational cost. We introduce Viral Pangenomes, a novel, efficient reference database derived from all NCBI viral species. Inspired by the bacterial pangenome concept, we segmented viral genomes into core (shared) and unique (species-specific) nucleotide regions. This approach achieved an unprecedented 88% compression ratio across the entire viral database, reducing the size from 6.95 billion to 828.6 million nucleotides. By consolidating core elements, the method significantly decreases the number of required pairwise alignments. This highly compact database, compatible with 150-nucleotide metagenomic reads, enables precise and specific viral annotation with dramatically reduced computational demands.

Introduction

Pangenomes, first introduced by Tettelin et al. (2005) for bacterial genomics, are established structures for microbial information analysis. This concept initially involved categorizing genes into core (shared), unique (species-specific), and dispensable components. Drawing inspiration from this framework, we propose "Viral Pangenomes," which are structures comprising core and unique nucleotide regions derived from viral genomes. The utilization of these novel reference sequences ensures species-level identification specificity while significantly reducing the number of pairwise comparisons conducted by alignment software, as core pangenome elements are consolidated into a single, non-species-specific representative sequence.

Graphical overview of our methodology

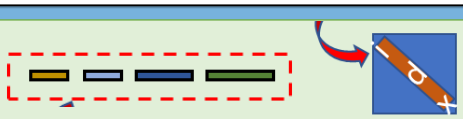


1 Viral sequences gathered from the NCBI virus DB

2 k-mers are generated for each sequence 200 l, 50 s

2MMC clusters and SEC clusters are obtained with their reperesentative sequences

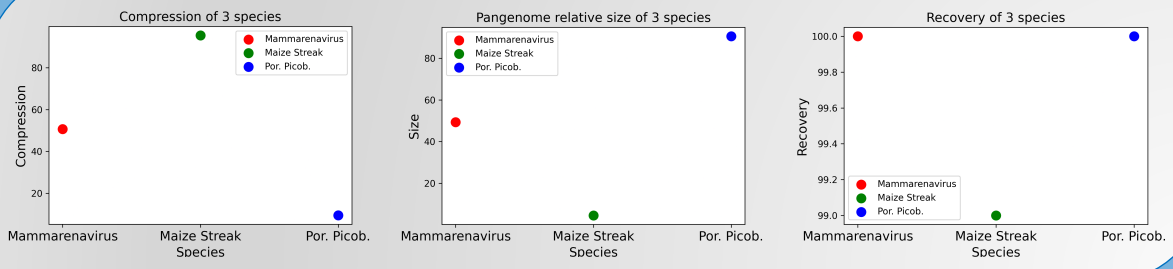
Representative sequences are merged and the pangenome is generated



Pangenomes are tested using FM-indexes for rapid alignment against their original sequences to determine a **recovery index.**

Results and conclusion

The proposed methodology significantly reduces the data required for species-level discrimination of several critical viral species, achieving high compression ratios: HIV (78%), Monkeypox (99%), SARS (99%), Influenza A (98%), and Hepacivirus C (87%). Applied to the entire viral database, a substantial 88% compression ratio was attained, reducing the total from 6,950,566,331 to 828,687,900 nucleotides. This optimized reference database is compatible with metagenomic pipelines supporting 150-nucleotide reads, substantially decreasing the computational resources necessary for pairwise alignment **while having near perfect sequence recovery.**



Acknowledgements

The author is thankful for the scholarship granted by CONACYT. Our research team is grateful for the computing resources provided by the MIZTLI supercomputer of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), through the General Directorate of Computing and Information and Communication Technologies (DGTIC), via project LANCAD-UNAM-DGTIC-350.We also thank Jérôme Jean Verleyen for his technical support with our research projects conducted on the Teopanzolco cluster at IBT-UNAM.

Founding

This work was funded by the projects SECTEI/138/2024 (to Zárate, S) from SECTEI-CDMX, CBF-2025-I-1026 from SECIHTI (to Taboada, B), and PAPIIT-DGAPA-IN230523 from DGAPA-UNAM (to Taboada, B).

References

Tettelin, H., Masignani, V., Cieslewicz, M. J., Donati, C., Medini, D., Ward, N. L., ... & Fraser, C. M. (2005). Genome analysis of multiple pathogenic isolates of Streptococcus agalactiae: implications for the microbial "pan-genome". Proceedings of the National Academy of Sciences, 102(39), 13950-13955.

Saha, S., Wang, Z., & Rajasekaran, S. (2020, September). HMSC: a Hybrid Metagenomic Sequence Classification Algorithm. In Proceedings of the 11th ACM International Conference on Bioinformatics, Computational Biology and Health Informatics (pp. 1-6).

Kim, D., Song, L., Breitwieser, F. P., & Salzberg, S. L. (2016). Centrifuge: rapid and sensitive classification of metagenomic sequences. Genome research, 26(12), 1721-1729.

Liao, H., Cai, D., & Sun, Y. (2022). VirStrain: a strain identification tool for RNA viruses. Genome biology, 23(1), 38.

CARACTERIZACIÓN NUTRICIONAL DE UNA BEBIDA DE SUBPRODUCTO DE AJONJOLÍ EXTRUDIDO

Jesús Geovani Armenta-Mendoza*, Cesar Alberto Camarena-Acosta*, Alexander Donaldo Hernández-García*, Martha Elena Vázquez-Ontiveros*, Jennifer Vianey Félix-Medina**, María Fernanda Quintero-Soto*

* Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra

** Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Culiacán, Tecnológico Nacional de México

Resumen

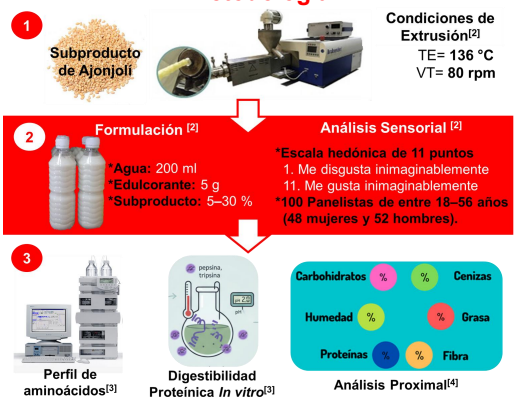
La búsqueda de materias primas alternativas para el desarrollo de nuevos alimentos es esencial para el futuro de los sistemas agroalimentarios. En este sentido, el subproducto de la extracción de aceite de ajonjolí es una fuente de nutrientes subutilizada; que al ser reprocesado por un proceso de valorización como la extrusión, que mejora sus características funcionales, puede utilizarse como materia prima en la elaboración de alimentos y bebidas. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una bebida a partir de este subproducto y evaluar su potencial nutricional y aceptabilidad. Se determinó su composición proximal, el perfil de aminoácidos, la digestibilidad proteínica *in vitro* y la aceptabilidad global. Los resultados mostraron que la bebida posee un perfil nutricional favorable, destacando su contenido de proteína de alta calidad. Además de presentar una buena digestibilidad y aceptabilidad. Este estudio demuestra el potencial del subproducto de ajonjolí como ingrediente para el desarrollo de alimentos con alto valor agregado, contribuyendo a la economía circular y la seguridad alimentaria.

Introducción

Alimentar a una población que está en constante crecimiento es un desafío de carácter global que ha impulsado la necesidad de promover e implementar sistemas agroalimentarios más sustentables; lo que involucra, la valorización de subproductos industriales y la reducción de pérdidas y desperdicios alimentarios[1]. La industria de extracción de aceite genera grandes volúmenes de subproductos ricos en nutrientes, un ejemplo es la torta prensada de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.), que generalmente se destina a alimentación animal o se desecha; Esta torta es una fuente importante de proteínas, fibra, minerales y compuestos bioactivos, lo que la vuelve una alternativa como un ingrediente funcional para el desarrollo de alimentos de consumo humano[2].

El desarrollo de bebidas alternativas es una tendencia creciente debido a la demanda de opciones sin lactosa, la sostenibilidad y el aumento del vegetarianismo. Sin embargo, muchas bebidas de origen vegetal carecen de un perfil nutricional completo. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la composición proximal, el perfil de aminoácidos, la digestibilidad proteínica *in vitro*, y aceptabilidad global de una bebida elaborada a base de subproducto de la extracción de aceite de ajonjolí. La valorización de este subproducto ofrece una alternativa alimentaria de alto valor nutricional.

Metodología



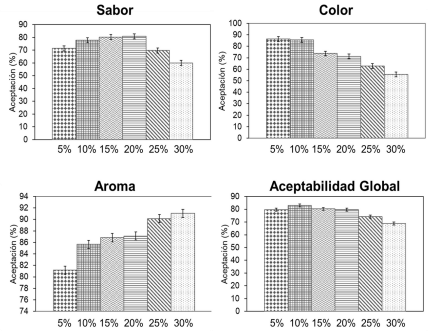


Figura 1. Análisis Sensorial de la bebida de subproducto de ajonjolí a diferentes concentraciones.

Resultados

Cuadro 1. Análisis proximal la bebida de subproducto de ajonjolí con mejor aceptación sensorial.

Composición Proximal	Bebida 10 % g/ 100 g bs (g/ 500 mL)	Control g/ 100 g bs (g/ 500 mL)
Proteína	38.15 ± 2.12^{a} (17.60 ± 0.92^{a})	9.56 ± 1.36^{b} (14.39 ± 1.25^{b})
Lípidos	6.45 ± 0.11^{b} (3.55 ± 0.92^{b})	16.45 ± 1.88^{a} (24.67 ± 3.62^{a})
Minerales	2.12 ± 0.03^{b} (0.95 ± 0.02^{b})	4.36 ± 1.02^{a} (6.50 ± 0.63^{a})
Fibra Dietaría		
Soluble	9.15 ± 0.12^{a} (4.75 ± 0.90^{a})	2.15 ± 0.65^{b} (3.25 ± 0.11^{b})
Insoluble	19.18 ± 0.36^{a} (10.05 ± 1.21^{a})	5.21 ± 0.15^{b} (7.65 ± 0.71^{b})
Total	28.33 ± 0.23^{a} (14.80 ± 1.05^{a})	7.25 ± 0.75^{b} (10.87 ± 0.12^{b})
Carbohidratos	24.95 ± 0.43^{b} (12.05 ± 0.05^{b})	62.38 ± 7.25^{a} (93.07 ± 5.26^{a})

Cuadro 2. Perfil de aminoácidos y valor biológico de la bebida de subproducto de ajonjolí con mejor aceptación sensorial.

Característica	Bebida 10 % g/ 100 g b.s (g/ 500 mL)	Control g/ 100 g b.s (g/ 500 mL)	FAO[1]
His	3.46 ± 0.05^{a} (1.73 ± 0.06a)	1.75 ± 0.02^{b} (0.87 ± 0.01b)	1.60
Ile	3.59 ± 0.81^{a} (1.80 ± 0.18a)	3.75 ± 0.53^{a} (1.87 ± 0.06a)	3.00
Leu	8.02 ± 0.06^{a} (4.01 ± 0.02a)	7.30 ± 0.04^{b} (3.65 ± 0.01b)	6.10
Lys	2.20 ± 0.05^{b} (1.10 ± 0.01b)	4.01 ± 0.12^{a} (2.00 ± 0.01a)	4.80
Met + Cys	5.09 ± 0.06^{a} (2.54 ± 0.15a)	4.06 ± 0.04^{b} (2.05 ± 0.00b)	2.30
Phe + Try	5.73 ± 0.05^{b} (2.86 ± 0.28b)	6.40 ± 0.01^{a} (3.25 ± 0.02a)	4.10
Thr	4.12 ± 0.04^{a} (2.06 ± 0.50a)	3.30 ± 0.03^{b} (1.65 ± 0.03b)	2.50
Trp	1.17 ± 0.08^{a} (0.58 ± 0.02a)	0.86 ± 0.06^{b} (0.42 ± 0.00b)	0.66
Val	4.48 ± 0.07^{a} (2.24 ± 0.06a)	4.75 ± 0.95^{a} (2.37 ± 0.03a)	4.00
Calificación Química	78.76	80.49	
AEL	Lys	Lys	
DPIV	88.29 ± 1.25^{a}	75.45 ± 1.15^{b}	
C-PER	1.58 ± 0.14^{a}	1.57 ± 0.23^{a}	

AEL: Aminoácido esencial limitante; **DPIV:** Digestibilidad Proteínica *In Vitro;* C-PER: Relación de eficiencia proteica calculada;

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la bebida de subproducto de ajonjolí posee un buen perfil nutricional, evidenciado por su composición química (proteínas, lípidos, fibra dietaría, minerales y carbohidratos), digestibilidad proteínica *in vitro* y perfil de aminoácidos esenciales. Dicho perfil de aminoácidos es similar al recomendado por la FAO para niños mayores de tres años. Además, su aceptabilidad sensorial resultó ser comparable a la de bebidas saborizadas tradicionales mexicanas (agua de horchata).

Gracias a su alto contenido de fibra dietaría, esta bebida se posiciona como una alternativa saludable y funcional para la nutrición de poblaciones vulnerables, como los adultos mayores. Su implementación como bebida saborizada escolar o suplemento podría desempeñar un papel significativo en el combate contra la desnutrición en México.

Referencias

1. Vilas-Franquesa, A., Montemurro, M., Casertano, M., & Fogliano, V. (2024). The food by-products bioprocess wheel: A guidance tool for the food industry. Trends in Food Science & Technology, 152, 104652. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104652.
2. Quintero-Soto, M. F., Espinoza-Moreno, R. J., Félix-Medina, J. V., Salas-López, F., López-Carrera, C. F., Argüelles-López, O. D., Vazquez-Ontiveros, M. E., & Gómez-Favela, M. A. (2022). Comparison of phytochemical profile and In vitro bioactivity of beverages based on the unprocessed and extruded sesame (Sesamum indicum L.) seed byproduct. Foods, 11(20), 3175. https://doi.org/10.3390/foods11203175.
3. Salas-López, F., Gutiérrez-Dorado, R., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E. O., Canizalez-Román, V. A., León-Sicairos, C. R., & Reyes-Moreno, C. (2018). Nutritional and antioxidant potential of a desert underutilized legume tepary bean (Phaseolus acutifolius). Optimization of germination bioprocess. Food Science and Technology (Campinas), 38(1), 254-262. https://doi.org/10.1590/fst.25316.
4. AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International; AOAC International: Gaithersburg, MA, USA, 2012.

Caracterización Proximal, Fitoquímica, Antioxidante e Hipoglucémica del Subproducto de la Industria Cervecera

Alan Ademir Saldaña-Vázquez*, Juan Antonio García-Castro*, Edgar Daniel Arzeta-Benitez*, Martha Elena Vázquez-Ontiveros*, Estrella Melisa Chavez-Millan*, María Fernanda Quintero-Soto*
* Departamento de Ingeniería en Alimentos, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra

Resumen

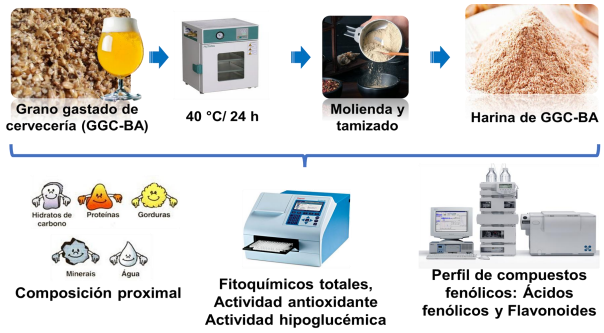
La cerveza es la bebida alcohólica más consumida en todo el mundo y su producción implica la generación de un gran volumen de subproductos (es decir, granos gastados, lúpulo gastado y levadura gastada). Debido a esto, es importante buscar alternativas que nos ayuden a minimizar y utilizar eficientemente este tipo de materia prima. En este sentido, se decidió caracterizar proximal y nutraceuticamente al subproducto de la elaboración de cerveza artesanal tipo "blonde ale" (GGC-BA). Observando que a pesar de haber pasado por procesamientos previos aun conservaba buen contenido de proteínas, lípidos, minerales, fibra dietaría, fitoquímicos y actividades biológicas. Entre los fitoquímicos identificados los que se presentaron en mayor proporción son ácido gálico y catequina. Por lo que, el GGC-BA es una buena alternativa para utilizarse como ingrediente funcional en la elaboración de nuevos alimentos.

Introducción

La cerveza es una de las bebidas más consumidas en el mundo, con una producción aproximada de 1.89 mil millones de hL (Ghajavand *et al.* 2024). Durante su producción se genera una gran cantidad de desperdicios (Avesani *et al.* 2023). Aproximadamente, se produce 1 kg de residuo húmedo por cada 5 L de cerveza (Ghajavand *et al.* 2024), debido a esto la valorización de los desperdicios de la elaboración de cerveza es esencial, no solo en México, sino también a escala global. Esto se puede realizar minimizando y utilizando eficazmente los desperdicios, ya que los desechos de alimentos ofrecen compuestos valiosos como son proteínas, fibra, polisacáridos y fitoquímicos (Jin *et al.* 2022).

El grano gastado de cervecería (GGC), es un subproducto de la elaboración de cerveza que ofrece una solución de doble propósito; tiene potencial para la generación de nuevos productos, debido a sus propiedades tecno-funcionales, así como, un modelo de negocios para la gestión sostenible de los recursos (Jin *et al.* 2022). Entre los posibles destinatarios del GGC, se encuentra la industria del plástico, la energética y la alimentaria (Ghajavand *et al.* 2024). Sin embargo, antes de pensar en utilizarlos como materia prima para el desarrollo de alimentos, es importante realizar una caracterización nutricional y nutracéutica de este subproducto tan abundante. En este sentido, en la presente investigación se planteó determinar la composición proximal, contenido de compuestos fitoquímicos totales, actividad antioxidante y actividad hipoglucémica del subproducto de la elaboración de cerveza artesanal tipo "blonde ale".

Metodología



Como materia prima se utilizaron GGC-Blonde Ale, los cuales fueron secados en un horno de convección, molidos y tamizados para obtener una harina fina. Se tomo una muestra representativa para determinar el contenido de proteína (método Kjeldahl), lípidos (método de Soxhlet), minerales (calcinación), fibra dietaría (Kit TDF-100, Supelco) y carbohidratos (diferencia de peso) (AOAC, 2012). Para la determinación de los compuestos fitoquímicos y actividades nutracéuticas se prepararon extractos metanólicos; los fenólicos y flavonoides totales se determinaron por espectrofotometría y el perfil de fenólicos individual se determino por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) (Quintero-Soto *et al.* 2022).

Conclusiones

Los subproductos de la industria cervecera actualmente infrautilizados, específicamente los granos gastados de cervecería artesanal, demostraron tener buenas características proximales y nutracéuticas; por lo que podrían utilizarse como parte de formulaciones en la elaboración de alimentos con buen contenido de proteínas, lípidos, minerales, fibra dietaría, compuestos fitoquímicos y actividades antioxidante e hipoglucémica. Sin embargo, tales aplicaciones requieren estudios adicionales que aborden las propiedades tecno-funcionales para conocer los posibles productos a elaborar.

Resultados

Cuadro 1. Composición proximal del Grano Gastado de Cerveza tipo Blonde Ale (GGC-BA)

Característica	GGC-BA (g/ 100 g)
Fibra dietaría	46.15 ± 2.27
Soluble	19.53 ± 3.08
Insoluble	26.62 ± 6.21
Proteína	27.15 ± 2.56
Lípidos	12.80 ± 1.60
Carbohidratos	10.89 ± 2.09
Minerales	5.01 ± 0.98

El principal componente químico en el GGC-BA fue la fibra dietaría, seguido de las proteínas, lípidos, carbohidratos y minerales. Dichos valores son similares a los reportados por otros autores (Jin *et al.* 2022). Estos valores son buenos considerando que vienen de un procesamiento previo donde algunas de estas características se degradan o transforman.

Cuadro 2. Contenido de compuestos fenólicos totales, flavonoides totales, actividad antioxidante y actividad hipoglucémica del GGC-BA

Característica	GGC-BA
Fitoquímicos Totales (mg/ 100 g)	
Fenólicos (EAG)	810.81 ± 19.40
Flavonoides (EQ)	383.15 ± 10.81
Actividad Antioxidante (µmol ET/100 g)	
ABTS	4,120.50 ± 136.48
DPPH	2,209.46 ± 76.15
Actividad Hipoglucémica (IC_{50}: µg/mL)	
α-amilasa	500.26 ± 23.15
α-glucosidasa	28.16 ± 2.05

El GGC-BA mostro buenos valores de compuestos fenólicos totales y flavonoides totales. Estos valores son comparables a los contenidos de fitoquímicos totales de diversos cereales y leguminosas íntegros como maíz y garbanzo. Los valores de actividad antioxidante y actividad hipoglucémica encontrados son superiores a los valores de subproductos de la industria alimentaria como ajonjolí, cascara de mango, entre otros (Jin *et al.* 2022; Correia Silva *et al.* 2024).

Cuadro 3. Perfil de compuestos fenólicos del GGC-BA

Compuesto fenólico	Contenido (µg/ g)
Ácido gálico	42.14 ± 0.12
Ácido protocatecuico	28.45 ± 1.56
Catequina	78.69 ± 2.78
Ácido cafeico	16.78 ± 0.02
Ácido siríngico	18.56 ± 1.69
Ácido ferúlico	16.28 ± 2.29
Quercetina	8.25 ± 1.25
Kaempferol	19.45 ± 0.58

El análisis del perfil de compuestos fenólicos del GGC-BA mostro principalmente ácidos fenólicos; donde el ácido gálico fue el mayoritario, seguido del ácido protocatecuico y ácido siríngico. Entre los flavonoides que se identificaron se encuentra la catequina, quercetina y kaempferol. Estos compuestos fenólicos han sido reportados previamente por otros investigadores y asociados a actividades biológicas importantes (Jin *et al.* 2022; Correia Silva *et al.* 2024).

Referencias

- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis of AOAC International. Gaithersburg, MA: AOAC International.
- Avesani, C. M., et al. (2023). Planetary Health, Nutrition, and Chronic Kidney Disease: Connecting the Dots for a Sustainable Future. Journal of Renal Nutrition, 33(6), S40-S48. https://doi.org/10.1053/j.jrn.2022.09.003.
- Correia Silva, L., et al. (2024). Influence of fermentation conditions by *Rhizopus oryzae* on the release of phenolic compounds, composition, and properties of brewer's spent grain. Food Bioscience, 61(1), 104591. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104591.
- Ghajavand, B., et al. (2024). Unlocking the Potential of Brewers' Spent Grain: A Sustainable Model to Use Beer for Better Outcome in Chronic Kidney Disease. Journal of Renal Nutrition, 34(6), 482-492. https://doi.org/10.1053/j.jrn.2024.03.007.
- Jin, Z., et al. (2022). Physicochemical composition, fermentable sugars, free amino acids, phenolics, and minerals in brewers' spent grains obtained from craft brewing operations. Journal of Cereal Science, 104(1), 103413. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103413.
- Quintero-Soto, M. F., et al. (2022). Comparison of Phytochemical Profile and *In Vitro* Bioactivity of Beverages Based on the Unprocessed and Extruded Sesame *(Sesamum indicum* L.) Seed Byproduct. Foods, 11(20), 3175. https://doi.org/10.3390/foods11203175.

Condiciones de producción para el *Pleurotus ostreatus*

Jazmín Sarahí Jiménez Ramos*, Carlos Manuel Astorga Zaragoza*, Eladio Martínez Rayón*, Cornelio Morales Morales**
*Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.
**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Querétaro, México.
e-mail: d23ce032@cenidet.tecnm.mx

RESUMEN

De las aproximadamente 70,000 especies de hongos clasificadas como *macromicetos*, se estima que cerca de 2,000 son aptas para el consumo humano. Entre ellas, *Pleurotus ostreatus*, conocido como hongo seta, destaca por su elevado valor nutricional.

Además en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los objetivos 1 (fin de la pobreza) y 2 (hambre cero).

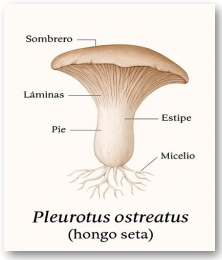


Fig.1 Partes principales del hongo seta.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo de *Pleurotus ostreatus* constituye una fuente alimenticia de alto valor nutricional, pero su etapa de fructificación requiere atención especializada [4]. Las variables críticas (temperatura, humedad, ventilación e iluminación) deben ser controladas cuidadosamente durante la inoculación, incubación y producción del sustrato, debido a que varían según la especie cultivada [2].

Cuando estas condiciones no se mantienen dentro de los rangos adecuados, el desarrollo de la fructificación se ve comprometido [1].

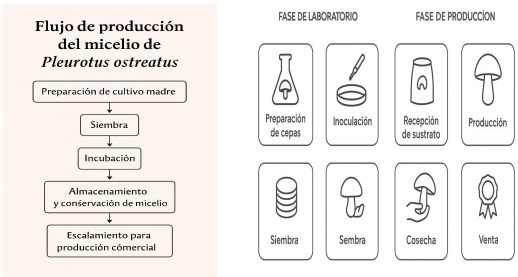


Fig. 2 Fases de la producción del *Pleurotus ostreatus.*

JUSTIFICACIÓN

El cultivo tradicional requiere el monitoreo de variables como la temperatura, la humedad, la ventilación y la iluminación. Cuando se mantiene en una cámara de fructificación, se logra una producción de mayor calidad en términos de tamaño, peso, color y sabor.

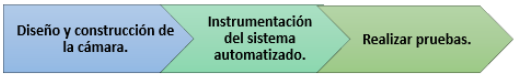
Fig.3 Cosecha de un cultivo tradicional.

PROPUESTA

Realizar la construcción de una cámara de fructificación diseñada específicamente para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, en la cual se controlen de manera precisa las variables ambientales: temperatura, humedad, ventilación e iluminación.

Esta infraestructura busca maximizar el desarrollo del hongo, garantizando condiciones constantes y reproducibles dentro de la cámara. Asimismo, la cámara cuenta con variables controladas bajo los siguientes parámetros: temperatura de 22 a 28 °C, humedad relativa entre 80 % y 90 %, iluminación mediante luces LED y dos ventiladores que proporcionan una adecuada aireación.

Fases de la metodología



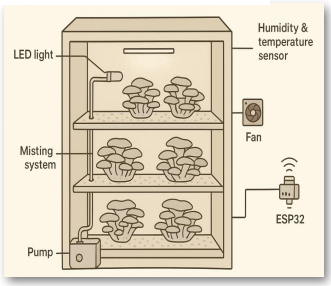


Fig. 4 Cámara fructificadora.

La implementación de esta cámara de fructificación permite mejorar significativamente los tiempos de producción, reduciendo en aproximadamente un 30 % el periodo necesario para la cosecha.

RESULTADOS

Con al uso de la cámara de fructificación, el tiempo de cosecha se reduce entre 35 y 45 días, lo que permite obtener resultados más rápidos y eficientes. Tal como se observa en la figura 5, las cosechas presentan mejoras significativas en color, tamaño y forma.

La calidad obtenida, en comparación con las producciones derivadas del cultivo tradicional, es notablemente superior.

Fig. 5 Cosechas obtenidas de la cámara fructificadora.

CONCLUSIONES

La implementación de una cámara de fructificación automatizada para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* constituye una alternativa eficiente y sostenible frente a los métodos tradicionales. Mediante el control preciso de variables como la temperatura, la humedad, la ventilación y la iluminación, se optimiza el desarrollo del hongo, lo que permite reducir significativamente los tiempos de producción y mejorar la calidad del producto final.

[1].-Ruiz Canales, A & Molina Martínez, J.M. (2021) Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización (Parte I). Infoagro Systems, S.L. Recuperado el 8 de febrero del 2021, en: https://www.infoagro.com/documentos/fundamentos_sistemas_control_del_riego_y_fertiliz acion parte_i_.asp
[2].-Gaitán-Hernández, R., Salmones, D., Pérez-Merlo, R., & Mata, G. (2006). Manual práctico del cultivo de setas: aislamiento, siembra y producción. Instituto de Ecología, AC, Xalapa, México.
[3].-Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G. 2681-P/Rev. Consultado 7 octubre. 2025. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/
[4].-Estrada Popoca, E. J. (2023). Evaluación de cultivo de Pleurotus ostreatus (hongo oreja de cazahuate) en dos condiciones de cultivo.

Diseño E Implementación De Un Dron Seguidor De Trayectoria Para Agricultura De Precisión

Garces De La Rosa Jonathan*, Hernández Montes David*, García Santiago Antonio*, Ramírez Castellanos Daniela*, Ruiz Gasca Marco Antonio*
*** Instituto Tecnológico de Tláhuac**
Departamento de Electrónica y Eléctrica

Resumen

El proyecto consiste en el desarrollo de un dron capaz de seguir trayectorias de manera autónoma con el fin de apoyar las actividades de agricultura de precisión. Su objetivo principal es realizar vuelos planificados y repetibles que permitan obtener información confiable sobre el estado de los cultivos, facilitando la detección temprana de plagas y enfermedades, así como el uso eficiente de insumos agrícolas.

Introducción

En la actualidad la agricultura de precisión surge como una estrategia clave al integrar tecnologías de procesamiento de imágenes con redes neuronales y análisis de datos para optimizar procesos agrícolas. En este contexto, los drones se consolidan como herramientas innovadoras para el monitoreo de cultivo, la detección temprana de plagas y la aplicación localizada de agroquímicos. No obstante para garantizar resultados confiables, es indispensable que estos equipos sigan una trayectoria de forma precisa y autónoma, cubriendo las áreas agrícolas de manera sistemática y repetible.

Objetivo

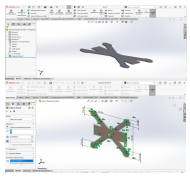
Diseñar e implementar un dron seguidor de trayectorias autónomo para realizar actividades de agricultura de precisión enfocado a detección de plagas..

Metodología

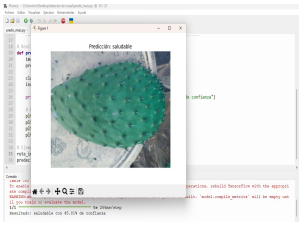
El proyecto se desarrolla en fases: primero se definieron los requisitos del dron; después se diseñó la arquitectura de hardware y software. Posteriormente, se realizó el modelado y simulación 3D para validar el diseño, seguido de la construcción e integración de los componentes. Luego se ejecutaron las pruebas de campo para verificar el seguimiento de trayectorias y, finalmente, se optimizó el sistema a partir del análisis de resultados y la detección de plagas. La arquitectura del dron está conformada por un chasis tipo cuadricóptero fabricado en plástico PLA. El sistema de control utilizado es un PID programado en una Raspberry Pi 3 el cual procesa los datos de los sensores, para mantener la estabilidad y seguir trayectorias. La detección de plagas se realiza mediante una red neuronal convolucional de 4 capas programada utilizando el módulo TensorFlow, las tres primeras capas detectan bordes, texturas y formas de manchas, la última realiza la clasificación de acuerdo a los patrones de plaga y enfermedad.

Resultados

Se obtuvo el desarrollo del dron autónomo que permite obtener un sistema innovador capaz de seguir trayectorias predefinidas con un alto grado de precisión y rentabilidad en parcelas agrícolas, lo que garantiza un monitoreo confiable y sistemático de los cultivos. La integración de un sistema de control y el agoritmo de detección de patrones mediante redes neuronales fucionó de manera correcta en las pruebas realizadas, la precisión en la detección o enfermedad en la planta de nopal, depende del número de imágenes que se usan durante el entrenamiento, que para el caso del proyecto fueron 500 para entrenamiento y 200 para validar el modelo. Se logro realizar una herramienta tecnológica de gran relevancia dentro de la agricultura de precisión, ya que permite a los productores optimizar el uso de recursos y tomar decisiones fundamentadas que incrementan la productividad mientras reducen el impacto ambiental. La capacidad del dron para recorrer de manera autónoma y ordenada diferentes áreas de cultivo asegura la cobertura total del terreno y disminuye el riesgo de errores humanos en el proceso de inspección de plagas en el cultivo. Con los resultados obtenidos se valida la eficacia del sistema implementado, consolidando al dron y su sistema de detección y monitoreo como una alternativa práctica y eficiente para la vigilancia agrícola, contribuyendo al fortalecimiento de las prácticas sostenibles en el sector agrícola.



Diseño 3D



Detección en software

Caso 1 saludable

Caso 2 plaga mancha

Caso 3 Mancha negra

Conclusiones

El desarrollo de un dron seguidor de trayectorias para agricultura de precisión representa una solución tecnológica innovadora que contribuye significativamente al sector agrícola. La implementación de sistemas de navegación autónoma y control de trayectorias permite realizar recorridos sistemáticos y repetibles sobre las parcelas, garantizando la obtención de datos confiables y en tiempo real. Esta capacidad facilita la detección temprana de plagas, el monitoreo del estado de los cultivos y la optimización en el uso de insumos, lo que se traduce en una producción más eficiente y sostenible.

Referencias

Mosqueda Moncada, D. (2025). *Drones en la agricultura: tipos y aplicaciones* (Monografía de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Repositorio UAAAN

López Santín, M. A. (2024). *Modelos de negocio de empresas de drones en la agricultura en México* (Tesis de maestría en Ciencias en Estrategia Agroempresarial). Universidad Autónoma Chapingo.

Casarrubias Cervantes, G. A. (2022). *Comparativa de precisión fotogramétrica digital en el uso de drones comerciales con base en un levantamiento topográfico de primer orden* (Tesis de Ingeniería Geomática). Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio de Tesis DGBSDI

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GALLETAS ENRIQUECIDAS CON HARINA DE CHICOZAPOTE (*Manilkara zapota*)

Francisco Jesús López Valverde, Danyra Sarahemna Casillas Ortiz*, José Ramón Serrano Díaz*, Estrella Melisa Chavez Millan*, María Fernanda Quintero Soto*, Martha Elena Vázquez Ontiveros*.
Licenciatura en Ingeniería en Alimentos. Universidad Politécnica del Mar y la Sierra.

Resumen

El presente trabajo se basa en la elaboración de una galleta incorporada con harina optimizada de chicozapote (*Manilkara zapota)* buscando una alternativa para ofrecer un producto al consumidor que aporte beneficio a la salud, para ello se elaboraron galletas incorporadas con diferentes proporciones de harina optimizada de chicozapote. Se realizó una evaluación sensorial empleando una escala idónea de 9 puntos, se evaluó su actividad antioxidante, contenido de fenólicos totales, contenido de antocianinas totales y flavonoides. Los resultados muestran aceptabilidad global de las galletas dentro del rango me gusta ligeramente y me gusta bastante, además, muestran contenidos potenciales de compuestos bioactivos que aportan beneficio a la salud de los consumidores.

Introducción

Las personas en su dieta han incluido productos de panadería incluyendo las galletas porque producen energía rápidamente, las consumen con mucha frecuencia como bocadillos o con diferentes comidas. Sin embargo, los expertos mencionan que las galletas de harina de trigo no contiene los suficientes nutrimentos. El chicozapote es un fruto que es de interés nutricional debido a su rica fuente de carotenoides, fenoles, vitaminas C y A, los cuales son compuestos con efecto protector por su actividad antioxidante. Este fruto seco en condiciones óptimas, genera harina con compuestos bioactivos que aportan beneficio a la salud. El objetivo del presente estudio busca evaluar las propiedades nutraceúticas y de aceptabilidad de galletas incorporadas con harina de chicozapote

Metodología

Elaboración de harina de chicozapote

Elaboración de galletas

A. Harina de trigo-chicozapote 60:40 sin azúcar
B. Harina de trigo-chicozapote 50:50 sin azúcar
C. Harina de trigo-chicozapote 60:40 con azúcar
D. Harina de trigo-chicozapote 50:50 con azúcar
E. Control harina de trigo 100 %

Evaluación sensorial

Se empleó una escala idónea de aceptabilidad de 9 puntos donde, 1 es me disgusta mucho, 2 me disgusta mucho, 3 me disgusta bastante, 4 me disgusta ligeramente, 5 ni me gusta ni me disgusta, 6 me gusta ligeramente, 7 me gusta bastante, 8 me gusta mucho y 9 me gusta muchísimo.

Caracterización

1. Actividad Antioxidante (ABTS)
2. Cuantificación de Antocianinas Totales (CAT)
3. Contenido de Fenólicos Totales (CFT)
4. Contenido de Flavonoides Totales (FT)

Análisis estadístico

Se utilizó un análisis se varianza de una sola vía y una comparación de medias mediante LSD con α=0.05

Conclusiones

Los resultados muestran que elaborar galletas incorporadas con harina optimizada de chicozapote es una buena opción para ofrecer productos de consumo frecuente que aporten beneficio a la salud de los consumidores, además de tener la alternativa de consumirlos con azúcares añadidos o sin ellos.

La galleta incorporada con harina de chicozapote que mayor aceptabilidad presentó fue la elaborada en proporciones 60:40 harina de trigo-chicozapote con valor de 6.9.

Resultados

Actividad antioxidante

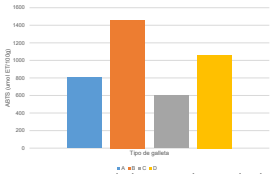


Figura 1. Actividad antioxidante de las diferentes galletas por el método ABTS

Contenido de Fenólicos Totales

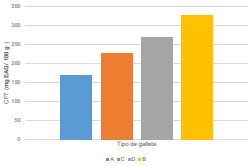


Figura 2. Contenido de Fenólicos Totales de las diferentes galletas

Contenido de Antocianinas Totales

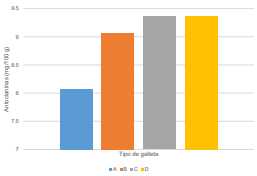


Figura 3. Contenido de Antocianinas Totales de las diferentes galletas

Contenido de Flavonoides Totales

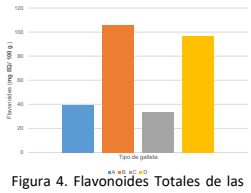


Figura 4. Flavonoides Totales de las diferentes galletas

Deseabilidad global

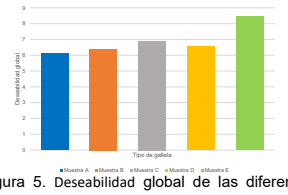


Figura 5. Deseabilidad global de las diferentes galletas

Los resultados de deseabilidad para las galletas incorporadas con harina de chicozapote optimizada se encuentran dentro del rango me gusta ligeramente y me gusta bastante, los cuales son valores aceptables para las galletas elaboradas en el proyecto.

Referencias

-Chavez-Millan, E. M., Vázquez-Ontiveros, M. E., Quintero-Soto, M. F., Rios-Herrera, G. D., Badilla-Medina, C. N., Félix-Medina, J. V., Diaz-Peña, I., Salas-López, F., & Argüelles-López, O. D. (2025). Optimization of the drying process of the chicozapote fruit (Manilkara zapota L.) on the techno-functional and nutraceutical properties. *Revista Bio Ciencias*. https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1780

-Panghal, A., Chhikara, N., & Khatkar, B. S. (2018). Effect of processing parameters and principal ingredients on quality of sugar snap cookies: a response surface approach. *Journal of Food Science and Technology*, *55*(8), 3127–3134. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3240-9

-Punia-Bangar, S., Sharma, N., Kaur, H., Kaur, M., Sandhu, K. S., Maqsood, S., & Ozogul, F. (2022). A review of Sapodilla (Manilkara zapota) in human nutrition, health, and industrial applications. *Trends in Food Science & Technology*, *127*, 319–334. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.05.016

Evaluación del Tipo de Fertilización y Aplicación de Estrés Abiótico Sobre los Compuestos Bioactivos de Chiltepín (*Capsicum annuum* var. aviculare)

Daniela Moreno Limón*, María Paula Quiroz Revilla**, Paola Hernández Carranza**, Sara Rodríguez Rodríguez**, Verónica Reyes García*, Enrique Ochoa Velasco**
* Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala/TecNM
** Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Resumen

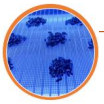
El presente trabajo tuvo como **objetivo evaluar** el efecto del tipo de fertilización y la irradiación con luz UV-C sobre los compuestos bioactivos (compuestos fenólicos totales, flavonoides y capsaicinoides), la capacidad antioxidante y la calidad de los frutos de chiltepín (*Capsicum annuum* var. *aviculare).* Los resultados indicaron que la fertilización orgánica presentó valores significativamente mayores en todos los compuestos bioactivos, en comparación con la fertilización química. Durante la segunda semana de tratamiento con luz UV-C durante 1 y 2 min, los resultados mostraron que los compuestos fenólicos fueron incrementados por el tratamiento con luz UV-C en ambos tratamientos, con valores de incremento de 50-82.98% y 22.0-30.5% para los tratamientos orgánico y químico, respectivamente. Sin embargo, el contenido de capsaicina y la capacidad antioxidante fueron mayores en los tratamientos químicos y con luz UV-C.

Introducción

Chiltepín ***Capsicum annuum* var. aviculare**

El chile, originario de México, tiene una gran diversidad con más de **64 variedades locales documentadas** y pertenece al género *Capsicum*.

Este chile, como otros del género *Capsicum*, es rico en **metabolitos secundarios**. Entre los más importantes se encuentran los **carotenoides**, los **compuestos fenólicos** y los **alcaloides**, como la **capsaicina**.



La irradiación UV-C puede inducir la producción de metabolitos secundarios, capsaicinoides, compuestos fenólicos, al actuar como factor de estrés que incrementa la pungencia y el contenido de compuestos bioactivos en *Capsicum* (Martínez-López et al., 2019; Juárez-Trujillo et al., 2022).

Objetivo específico

Determinar si la aplicación de estrés abiótico mediante luz UV-C produce un aumento significativo en la concentración de compuestos fenólicos, flavonoides y capsaicinoides en los frutos de chiltepín.

Metodología

Universidad Benito Juárez García ubicada en el municipio de Chiautzingo, Puebla.

Tipo de fertilización

Tratamientos	Fertilización granulada	Fertilización foliar
Testigo	Agua	Agua
Orgánico	Humus de lombriz (20g) y composta (20g)	Lixiviados de humus
Químico	Urea y DAP (15 g)	Agro-k amino, nitro-sol y poliquel-multi
Mixto	Urea y DAP (15 g)	Lixiviados de humus y agro-k amino, nitro-sol y poliquel-multi

Tabla 1. Tratamientos realizados al chiltepín durante su desarrollo.

- Compuestos fenólicos totales
- Flavonoides totales
- Capsaicinas totales
- Capacidad antioxidante Jattar-Santiago et al., 2022

Resultados

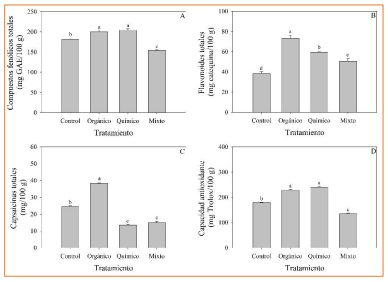


Figura 1. Efecto del tratamiento de fertilización sobre los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de chiltepín.

De manera general, se observa que el tratamiento con luz UV-C favorece la síntesis de compuestos fenólicos totales, tanto en chiltepín orgánico como en el químico. Sin embargo, los flavonoides totales, capsaicinas y capacidad antioxidante, su efecto se ven afectado por el tipo de fertilización y el tratamiento con luz UV-C. En este sentido, el tratamiento químico durante 2 minutos de irradiación UV-C potencia tanto el contenido de capsaicinas como la capacidad antioxidante, comparado con el tratamiento orgánico control (sin irradiar) como aquellos irradiados por 1 y 2 min. Lo cual puede deberse a que al tener una mayor concentración de nitrógeno durante su desarrollo, el chiltepín puede generar una mayor síntesis de aminoácidos, los cuales pueden potenciar el efecto de la luz UV-C en la formación de alcaloides (Li et al., 2022).

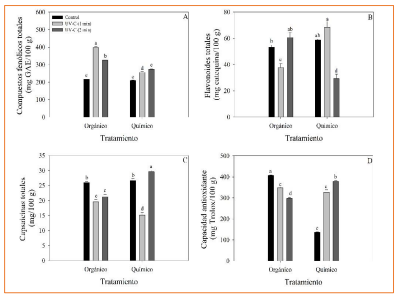


Figura 2. Efecto del tratamiento con luz UV-C sobre los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de chiltepín.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, la fertilización orgánica fue la que presentó el mayor contenido de compuestos bioactivos con capacidad antioxidante, seguido del tratamiento químico. Después de una semana de irradiación, también los resultados indican mayores concentraciones en los tratamientos evaluados (orgánico y químico). Sin embargo, fue el tratamiento orgánico con luz el que presentó el mayor contenido de compuestos fenólicos, capsaicinoides totales y capacidad antioxidante.

Referencias

•De la Cruz Ricardez, D., Ortiz García, C., Lagunes Espinoza, L., Torres de la Cruz, M., & Hernández Nataren, E. (2020). Compuestos Fenólicos, Carotenoide y Capsaicinosides en frutos de *Capsicum spp.* de Tabasco, México. *n Agrociencia*, 505 -519.
•Hallmann, E., Rembiałkowska, E. (2012). Caracterización de compuestos antioxidantes en pimiento dulce (*Capsicum annuum* L.) cultivado en sistemas orgánicos y convencionales. *J. Sci. Food Agric.* 92: 2409–2415.
•Jattar-Santiago, KY, Ramírez-López, C., Hernández-Carranza, P., Ávila- Sosa, R., Ruiz-López, II, Ochoa-Velasco, CE (2022). Efecto de las condiciones de extracción sobre los compuestos antioxidantes del chile habanero (*Capsicum chinense*) y su potencial uso como antimicrobiano. *Revista de procesamiento y conservación de alimentos.n* . E16427.
•Li, Q., Xu, J., Yang, L., Sun, Y., Zhou, X., Zheng, Y., Zhang, Y., Cai, Y. (2022). La calidad de la luz LED afecta el crecimiento, el contenido de alcaloides y la expresión de genes de la ruta biosintética de alcaloides de Amaryllidaceae en *Lycoris longituba* . *Journal of Plant Growth Regulation* , 41:257–270.

PELÍCULA COMESTIBLE DE ALMIDÓN *(Sechium edule)* CON LIPOSOMAS

Yamel I Solano-G.[1], Lucio A. Vázquez-León[2], José M. Juárez-Barrientos[3], Alejandro Aparicio Saguilán[4], Delia E. Páramo Calderón[5*]
[1, 3, 4, 5] **Universidad del Papaloapan – Campus Tuxtepec / Loma Bonita.**
[2] **SECIHTI - Instituto Tecnológico de Tehuacán.**

Resumen

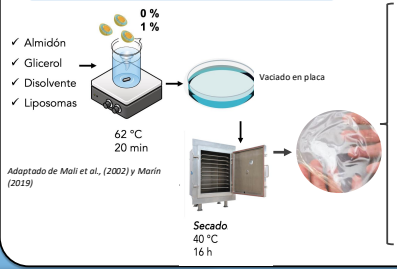
El objetivo de este trabajo fue desarrollar mediante la técnica de vaciado en placa, una película comestible a base de almidón de *Sechium edule* (chayotextle), incorporando extracto de *Moringa oleifera* encapsulado previamente en liposomas. La incorporación de liposomas se confirmó por microscopía electrónica de barrido, y se observó mediante calorimetría diferencial de barrido un incremento en la temperatura de fusión del liposoma al ser integrado en la película. Además, incrementó el porcentaje de elongación y se redujo la elasticidad de la película con liposomas, en comparación con la película testigo. Estos resultados sugieren que las películas desarrolladas protegen a los liposomas y mejoran las propiedades mecánicas.

Introducción

El desarrollo de películas comestibles a base de biopolímeros representa una alternativa innovadora en la industria de empaques de alimentos. El objetivo de este proyecto fue desarrollar una película a base de almidón de chayotextle incorporando extracto de *Moringa oleifera* encapsulado en liposomas. Esta estrategia combina la funcionalidad antioxidante del extracto con una matriz polimérica, generando un material biodegradable con propiedades bioactivas y aplicaciones prometedoras en la conservación de alimentos.

Metodología

ELABORACIÓN DE PELÍCULAS



Adaptado de Mali et al., (2002) y Marín (2019)

CARACTERIZACIÓN

- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
  FE-SEM – aceleración 3 kV
- Determinación de color
- Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)
  2 mg de muestra de 5 a 300 °C a 10 °C/min bajo flujo de N_2 (50 cm^3/min)
- Propiedades mecánicas:
  Tensión a la fractura (TF)
  % Elongación (%E)
  Módulo de elasticidad (ME)

Resultados

MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

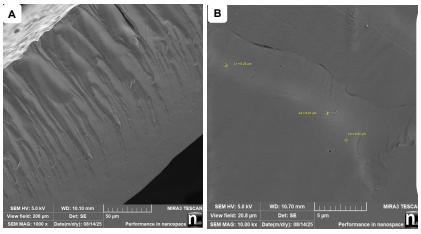


Figura 1. Micrografías de película de almidón de chayotextle sin liposomas (A) y con liposomas (B).

CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

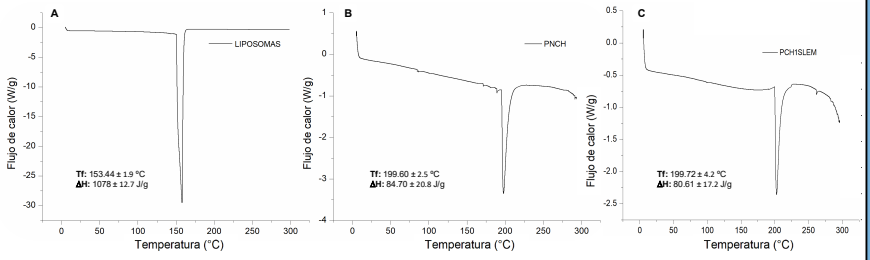


Figura 2. Termogramas de liposomas libres (A), de película de almidón de chayotextle sin liposomas (B) y película con liposomas (C).

Las micrografías muestran partículas asociadas a los liposomas (Figura 1A). En comparación al control se observa una superficie interna lisa.

En cuanto a la evaluación de color, si hubo un efecto significativo en los tres parámetros, asociado a la coloración de la solución liposomal empleada.

DETERMINACIÓN DE COLOR

	Control	PCH1SLEM
L	92.7±0.2[a]	85.4±0.7[b]
a*	-0.3±0.02[a]	-1.3 ± 0.09[b]
b*	0.2 ± 0.03[a]	2.8 ± 0.1[b]

L: luminosidad (0 = negro, 100 = blanco), *a*< componente roja (+) o verde (-), y b+: componente amarilla (+) o azul (-). Medias ± desviación estándar; n=3, letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Se observa una transición a 153.44 °C para el liposoma libre(Figura 2A), la cual está asociada a la temperatura de fusión (Tf) y requiere una alta energía. La Tf incrementa a 199.72 °C cuando se incorporan en la matriz polimérica (Figura 2C) lo cual favorece la estabilidad térmica de los liposomas.

PROPIEDADES MECÁNICAS

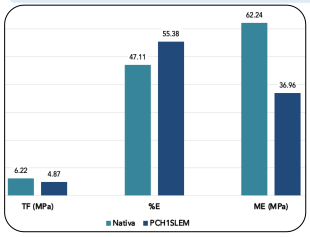


Figura 3. Propiedades mecánicas de películas de almidón de chayotextle con y sin liposomas.

La incorporación de liposomas disminuye la tensión a la fractura (6.22 a 4.87 MPa), siendo mayor a lo reportado por Martínez-Ortiz *et al.*, (2019). El mismo comportamiento ocurre con el módulo de elasticidad (62.24 a 36.96 MPa). El porcentaje de elongación aumentó (47.11 a 55.38 %), atribuido a la capacidad plastificante del liposoma.

Conclusiones

Se logró desarrollar una película a base de almidón de chayotextle adicionada con extracto de moringa encapsulado en liposomas. Confirmado por SEM, a través de partículas esféricas con diámetro aproximado de 200 nm.

Los resultados del análisis térmico sugieren que los liposomas son protegidos por la matriz polimérica desarrollada.

La adición de los liposomas modifica el color hacia tonalidades verdes y amarillas con menor luminosidad. Además, modifica las propiedades mecánicas hacia materiales más flexibles y menos rígidos.

Referencias

- Martínez-Ortiz, M. A., Palma-Rodríguez, H. M., Montalvo-González, E., Sáyago-Ayerdi, S. G., Utrilla-Coello, R., & Vargas-Torres, A. (2019). Effect of using microencapsulated ascorbic acid in coatings based on resistant starch chayotextle on the quality of guava fruit. Scientia Horticulturae, 256, 108604
- Mali, S., Grossmann, M. V. E., García, M. A., Martino, M. N. and Zaritzky, N. E. 2002. Microstructural characterization of yam starch films. Carbohydr Polym. 50: 379-386. DOI:10.1016/S0144-8617(02)00058-9
- Marín Peñalver, D. 2019. Nanoliposomas a partir de productos naturales infrautilizados y residuos agroalimentarios como ingrediente funcional en alimentos. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Potencial Antioxidante, Fitoquímico y Tecno-Funcional de la Semilla de Aguacate

Brisel Yamilet Manjarrez-Martínez*, Erlin Esmeralda Sarabia-García*, Kenia Juleisi López-Samaniego*, Britsy María Ayala-Martínez*,

Martha Elena Vázquez-Ontiveros*, María Fernanda Quintero-Soto*

* Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra

Resumen

Esta investigación aborda, los atributos tecnológicos de la semilla de aguacate y su capacidad funcional como harina, ingrediente o extracto; analizando sus propiedades nutracéuticas. A partir de ello, se generara conocimiento con potencial aplicación industrial, para contribuir al fortalecimiento de cadenas agroalimentarias sostenibles y de bajo impacto ambiental. Las propiedades tecno-funcionales que se evaluaron fueron el índice de adsorción de aceite (26.66 %), índice de adsorción de agua (1.97 g/g) e índice de solubilidad en agua (5.5 %). Dentro de las propiedades nutracéuticas se evaluó el contenido de fitoquímicos totales (fenólicos, 478.58 mg EAG/100g; flavonoides, 880.75 mg EQ/100 g; antocianinas, 14.45 mg/100 g) y actividad antioxidante (ABTS, 680.33 µmol ET/100 g; DPPH, 369.09 µmol ET/100 g). De esta manera, se persigue aportar evidencia científica sobre un subproducto poco valorado y hasta ahora subutilizado, con impacto en salud, tecnología y economía circular.

Introducción

El aguacate (*Persea americana* L.) es originario de Mesoamérica, con una historia de domesticación que se remonta a más de 10,000 años en lugares como Coxcatlán, Puebla, México. Existen tres linajes principales: mexicana, guatemalteca y antillana. Su nombre proviene del náhuatl āhuacatl. Tras la llegada de los europeos, se convirtió en un cultivo global, siendo la variedad Hass la dominante hoy en día (más del 80% del mercado).

El fruto es considerado un "superalimento" debido a su alto valor nutritivo. Destaca por su perfil lipídico, con más del 70% de grasas monoinsaturadas (ácido oleico) que benefician la salud cardiovascular. Además, es fuente de fibra, potasio, vitaminas (E, K, A, B) y antioxidantes.

Actualmente, la semilla de aguacate, un agro-residuo abundante, es objeto de estudio por su potencial nutracéutico y funcional. Contiene compuestos fenólicos, fibra y antioxidantes, alineándose con la economía circular y la valorización de residuos. La presente investigación busca caracterizar las propiedades tecno-funcionales y nutracéuticas de la semilla para diversificar ingredientes en las industrias alimentaria y farmacéutica, cumpliendo con los objetivos de desarrollo sustentable.

Metodología

Resultados

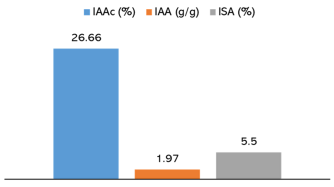


Figura 1. Índice de absorción de aceite, índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua de la harina de semilla de aguacate.

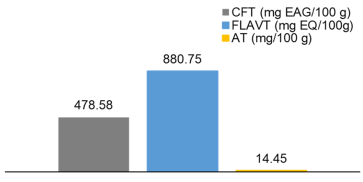


Figura 2. Contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y antocianinas totales de la harina de semilla de aguacate.

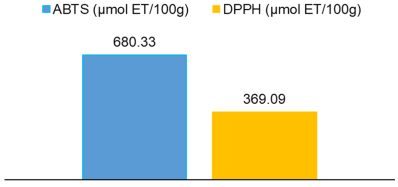


Figura 3. Actividad antioxidante de la harina de semilla de aguacate.

Conclusiones

Los valores tecno-funcionales de la harina de semilla de aguacate (IAAc: 26.66 %; IAA: 19.7 %; ISA: 5.5 %) reflejan un perfil técnico adecuado para aplicaciones innovadoras dentro de la industria de alimentos. Este conocimiento abre camino hacia su incorporación en formulaciones funcionales y la creación de valor en una cadena de producción más sostenible. Los elevados contenidos de compuestos fenólicos totales (478.58 mg EAG/100 g), flavonoides totales (880.75 mg EQ/100 g) y antocianinas (14.15 mg/100 g) posicionan la harina de semilla de aguacate como un ingrediente versátil y funcional de alto valor agregado. Sus propiedades fitoquímicas sugieren aplicaciones en alimentos antioxidantes, suplementos, bebidas, colorantes naturales y sistemas de liberación controlada. .Los resultados obtenidos para la harina de semilla de aguacate evaluada mediante ABTS (680.33 µmol TE/100 g) y DPPH (369.09 µmol TE/100 g) evidencian una capacidad antioxidante notable, posicionando al ingrediente como una opción funcional y sostenible dentro de la valorización de residuos agroindustriales. Este tipo de valorización no solo mejora la eficiencia industrial y económica, sino que también promueve soluciones sostenibles en la cadena alimentaria.

Referencias

1. Castro-López, C., Bautista-Hernández, I., González-Hernández, M. D., Martínez-Ávila, G. C. G., Rojas, R., Gutiérrez-Díez, A., Medina-Herrera, N., & Aguirre-Arzola, V. E. (2019). Polyphenolic Profile and Antioxidant Activity of Leaf Purified Hydroalcoholic Extracts from Seven Mexican Persea americana Cultivars. Molecules, 24(1). https://doi.org/10.3390/molecules24010173
2. Rodríguez-Carpena, J.-G., Morcuende, D., Andrade, M.-J., Kylli, P., & Estévez, M. (2011). Avocado (*Persea americana* Mill.) Phenolics, In Vitro Antioxidant and Antimicrobial Activities, and Inhibition of Lipid and Protein Oxidation in Porcine Patties. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59(10), 5625–5635. https://doi.org/10.1021/jf1048832
3. Siol, M., & Sadowska, A. (2023). Chemical Composition, Physicochemical and Bioactive Properties of Avocado (*Persea americana*) Seed and Its Potential Use in Functional Food Design. Agriculture, 13(2). https://doi.org/10.3390/agriculture13020316.
4. Velderrain-Rodríguez, G. R., Quero, J., Osada, J., Martín-Belloso, O., & Rodríguez-Yoldi, M. J. (2021). Phenolic-Rich Extracts from Avocado Fruit Residues as Functional Food Ingredients with Antioxidant and Antiproliferative Properties. Biomolecules, 11(7). https://doi.org/10.3390/biom11070977

Robot móvil analizador de macronutrientes de suelo

Diana Nuñez Ramírez,
Santiago Almonaci Becerra
Marco A. Ruíz Gasca,
Instituto Tecnológico de Tláhuac (ITT)

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de un prototipo de robot móvil sustentable diseñado para el análisis de macronutrientes NPK en suelos de invernadero, aplicado al cultivo de Cempoalxóchitl (Tagetes erecta) en Tláhuac, Ciudad de México. El dispositivo integra sensores para medir nitrógeno, fósforo y potasio, así como temperatura y humedad, transmitiendo los datos de forma inalámbrica. Las pruebas en campo mostraron que el robot obtiene mediciones rápidas y confiables, reduciendo los tiempos frente a métodos químicos tradicionales. Los resultados evidencian que un manejo equilibrado de nutrientes mejora significativamente el tamaño y calidad de las flores. Este prototipo representa una herramienta tecnológica innovadora y sustentable para apoyar la agricultura urbana.

Introducción

La actividad agrícola en zonas urbanas enfrenta el reto de optimizar recursos para la producción sustentable. En Tláhuac, Ciudad de México, el cultivo de Cempoalxóchitl (Tagetes erecta) tiene un valor cultural y económico, pero se desarrolla de manera empírica, sin herramientas tecnológicas que permitan un manejo preciso de nutrientes y condiciones ambientales.

Fig 1. Flor del grupo 2.

El objetivo de esta investigación es diseñar y construir un prototipo de robot móvil capaz de medir los niveles de macronutrientes esenciales (Nitrógeno, Fósforo y Potasio), además de parámetros ambientales como temperatura y humedad. Con estos datos se busca apoyar a los productores en la toma de decisiones sobre fertilización, riego y manejo de cultivos, reduciendo pérdidas y mejorando la calidad de las flores. Asimismo, se integró un sistema de carga sustentable mediante paneles solares, que favorece la autonomía energética del dispositivo.

Metodología

El desarrollo se dividió en dos etapas principales: diseño del robot y proceso de cultivo de Cempoalxóchitl en contenedor.
El robot cuenta con tracción diferencial en cuatro ruedas, sensores NPK y de humedad, así como un módulo Bluetooth para transmisión de datos.

Fig 2. Registro de NPK.

La programación se implementó en tres fases: control de motores, lectura de sensores y unificación de rutinas, asegurando la independencia de procesos. Para la autonomía energética se diseñó una estación de carga con paneles solares ajustables a la latitud de la zona.
El cultivo experimental se realizó en San Andrés Mixquic, Tláhuac. Se trabajó con dos grupos: Un grupo con tierra convencional (GRUPO A) y otro grupo con composta y fertilización (GRUPO B). Posteriormente se midieron niveles de NPK, humedad y temperatura, comparando los resultados entre grupos y etapas de crecimiento.

Resultados

El robot logró realizar mediciones confiables y rápidas de nutrientes y parámetros ambientales, en contraste con las pruebas químicas rápidas que requieren mayor tiempo y pueden llegar a presentar ambigüedades si el laboratorio no esta certificado, además de que el costo es mayor. En el cultivo, el grupo B con composta mostró mejores resultados: mayor concentración de NPK, altura promedio de 1.5 m y flores de hasta 12.5 cm de diámetro, en comparación con el grupo de tierra convencional, llamado grupo A . Se observó que un exceso de fertilización incrementó el tamaño de las plantas, pero también debilitó los tallos, generando pérdidas. El análisis evidencia la importancia de equilibrar nutrientes para obtener un cultivo óptimo. Los resultados sugieren que el prototipo puede ser una herramienta útil para monitorear de forma continua la calidad del suelo y apoyar la agricultura urbana sustentable en invernaderos.

GRUPO	PLANTAS	NUTRIENTES (mg kg-1)	TAMAÑO DE TALLO	TAMAÑO DE FLOR/BOTÓN
A	20	N=55.6 P=27.2 K=31.8	1.0m -1.2m	Diámetro de la flor 10cm-11cm.
B	20	N=136 P=121 K=90	1.5m-1.7m	Diámetro de la flor 10cm-12.5cm

Tabla 1. Comparación de las mediciones Nitrógeno(N), Fosforo (P), Potasio (K), los tamaños de flor y tallo.

Conclusiones

El prototipo desarrollado demostró ser una herramienta eficiente para medir nutrientes NPK y parámetros ambientales en el cultivo de Cempoalxóchitl. Su diseño autónomo y sustentable permite obtener resultados rápidos y confiables, superando las limitaciones de métodos tradicionales. Los ensayos evidenciaron que un manejo equilibrado de nutrientes mejora el tamaño y calidad de las flores. Este robot representa una opción innovadora y práctica para apoyar a los productores en la toma de decisiones, contribuyendo a una agricultura urbana más sustentable.

Referencias

•Serrato-Cruz, M. A. (2022). *Prácticas de cultivo de la flor de muerto (Tagetes erecta L.) y móviles culturales*. Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 19(3). https://doi.org/10.22231/asyd. 19i3.1339
•Sonklien, C., Intanon, P., Terapontanakorn, S., & Intanon, R. (2020). Comparative Assessment of Fertilizers on Yield and Quality of Marigold (Tagetes erecta L.). *Indian Journal of Agricultural Research, 54*(3), 367–372.
•Bouhoun, A., Bournet, P. E., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2019). Using CFD to improve the irrigation strategy for growing ornamental plants inside a greenhouse. *Biosystems Engineering, 186,* 130–145. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.021

Aplicación web para visualizar parámetros de calidad del agua

Jorge Cein Villanueva Guzmán*, Julio César Romellón Cerino*, Ezequiel Gómez Domínguez**, Víctor Manuel Arias Peregrino*, Pedro Zamora Reséndiz***, Nayeli del Carmen López López*
*Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Villahermosa
** Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Mérida
*** Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Querétaro

Resumen

El proyecto en desarrollo tiene como objetivo la creación de una aplicación web con almacenamiento y procesamiento de datos en la nube para un sistema de monitoreo de calidad del agua en estanques de crianza de alevines de tilapia, basado en tecnología IoT y destinado a optimizar la gestión de información en entornos acuícolas. La aplicación web obtiene los datos que son enviados por el prototipo basado en Arduino© UNO R4 WiFi con sensores de los parámetros de pH, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto y temperatura. El resultado obtenido hasta el momento es una aplicación web que mediante APIs obtiene los valores almacenados en una base de datos en Firebase© y los muestra en un dashborad. A partir de lo anterior, se concluye en la importancia de implementar nuevas tecnologías en actividades primarias como en la acuicultura, para disminuir la mortandad de los alevines por la mala calidad del agua.

Introducción

El agua es el eje central de la vida y de múltiples actividades productivas en todo el planeta. En acuicultura, se depende directamente de la calidad del agua para asegurar la salud, el crecimiento y la supervivencia de los peces. Entre los parámetros más relevantes se encuentran el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y los sólidos disueltos totales (TDS), mantener estos valores dentro de los rangos adecuados es esencial para evitar el estrés y la mortalidad de los organismos.

Mediante el uso de nuevas tecnologías como: Python, IoT, base de datos en la nube (Firebase) y desarrollo de APIs en Node.js, se está desarrollando una aplicación web para la visualización en tiempo real de los valores de los parámetros enviados por un prototipo desarrollado en Arduino.

Metodología

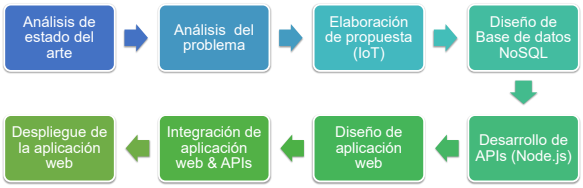


Fig. 1. Metodología empleada en la aplicación web. Fuente: creación propia.

Resultados

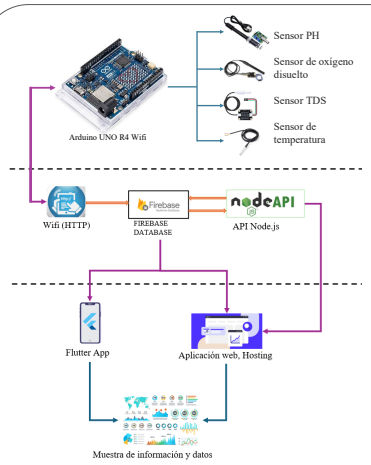


Fig. 2. Arquitectura de la aplicación web. Fuente: Creación propia.

La aplicación se conforma por los siguientes componentes principales (Fig. 2):

- **Captura de datos:** Sensores conectados a **Arduino UNO R4 WiFi**, encargado de procesar las señales y transmitirlas a la nube mediante el protocolo **HTTP/HTTPS** hacia **Firebase Realtime Database**.
- **Almacenamiento y procesamiento en la nube:** Uso de **Firebase** como plataforma principal para la gestión de datos en tiempo real (**Fig. 3**).
- **Backend y API:** Desarrollo de **APIs en Node.js**, para recibir, validar y distribuir los datos almacenados en Firebase hacia los clientes.
- **Aplicación web:** Desarrollada con Python, JavaScript, HTML y pico.css para la representación gráfica en tiempo real de los parámetros del agua (**Fig. 4, Fig. 5**).

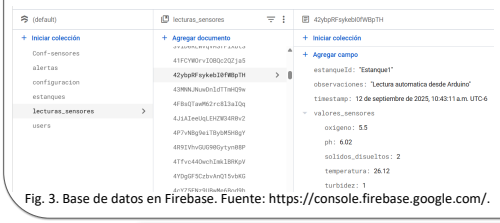


Fig. 3. Base de datos en Firebase. Fuente: https://console.firebase.google.com/.

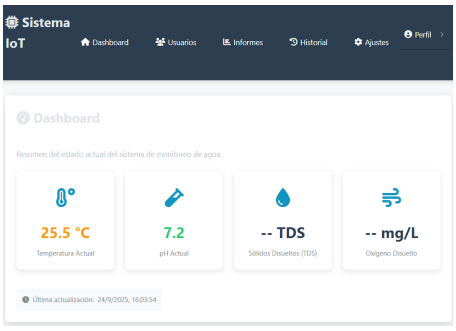


Fig. 4. Primera versión de la aplicación web.

Fig. 5. Monitoreo de estanques.

Conclusiones

El monitoreo de la calidad del agua es un aspecto primordial para la preservación de diversos aspectos de la vida tales como los recursos hídricos y la salud pública. La combinación tecnológica empleada hasta la emisión de este cartel para el desarrollo de la aplicación web, ha permitido la visualización de parámetros fisicoquímicos del agua tales como PH, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales y temperatura desde una plataforma accesible desde cualquier ubicación geográfica en donde se cuente con una conexión a internet.

Esta integración de tecnologías permite desarrollar nuevas soluciones capaces de realizar mediciones en tiempo real facilitando la detección de anomalías y toma de decisiones oportunas para disminuir pérdidas económicas.

Referencias

Arafat. (22 de Enero de 2023). DEV. Obtenido de Mejora la semántica de tu HTML con Pico CSS: https://dev.to/arafat4693/improve-your-html-semantic-with-pico-css-4obp

Bertel López, Y. Y. (2024). Monitoreo de la calidad del agua en criaderos de tilapias mediante tecnologías LPWAN y VPS. Obtenido de ResearchGate / Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD): https://www.researchgate.net/publication/380562402_Monitoreo_de_la_Calidad_del_Agua_en_Criaderos_de_Tilapias_Mediante_Tecnologias_Lpwan_y_VPS

Firebase. (2023). Firebase documentation. Obtenido de Google Firebase.

Mehare, H. B., Anilkumar, J. P., & Usmani , N. A. (2023). The Python Programming Language. En A Guide to Applied Machine Learning for Biologists (págs. 27-60). Springer International Publishing.

Seobility Wiki. (2024). API REST. Https://Www.Seobility.Net/Es/Wiki/API_REST.

Diseño y Modelado de una Máquina de Embobinado de Filamento para Fabricación de Tubos Compuestos

Alvaro De Jesús-Ramírez[1], Carlos De Jesús-Ramírez[1], Fernanda De Jesús-Ramírez[2], Arturo Abúndez-Pliego[2]
[1] Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Libres. Camino Real s/n, Barrio de Tetela C.P. 73780, Libres, Puebla, México
[2] Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Int. Internado Palmira s/n. Col. Palmira. C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

Introducción

En la actualidad, la fabricación de estructuras tubulares de materiales compuestos mediante embobinado de filamento enfrenta desafíos que afectan la calidad y repetitividad de las piezas (Dattatray *et al*., 2011; Quanjin *et al*., 2018). Entre los factores críticos se encuentran la porosidad y la orientación del filamento, ya que un contenido de porosidad mayor al 5 % puede reducir significativamente las propiedades mecánicas y favorecer fallas prematuras como delaminaciones o fisuras interlaminares (Zhang *et al*., 2023). La tensión aplicada al filamento es determinante: valores excesivos fracturan las fibras, mientras que tensiones bajas provocan baja compactación y aumento de porosidad, disminuyendo la resistencia del laminado (Sun *et al*., 2019). De igual manera, controlar la viscosidad de la resina epóxica durante la impregnación es esencial, pues viscosidades inadecuadas generan defectos superficiales o zonas débiles (Gu *et al*., 2018). Por ello, se propone el diseño y modelado de una máquina capaz de optimizar parámetros clave: tensión, velocidad, ángulo de enrollado e impregnación de resina, para fabricar tubos compuestos con mayor uniformidad, repetitividad y resistencia mecánica. Este desarrollo no solo fortalece la investigación académica, sino que también contribuye a la innovación industrial, favoreciendo la transferencia de conocimiento hacia sectores como el automotriz, aeroespacial e infraestructura (Cui *et al*., 2020; Sun *et al*., 2019).

Objetivos

Diseñar y modelar una máquina de embobinado de filamento que permita la fabricación de tubos compuestos con control de velocidad, ángulo de enrollado y tensión del filamento.

Objetivos específicos

- Desarrollar el diseño mecánico y estructural de la máquina en SolidWorks.
- Seleccionar y dimensionar los componentes mecánicos y electrónicos.
- Proponer un sistema de control para sincronizar el giro del mandril y el desplazamiento del carro.

Metodología

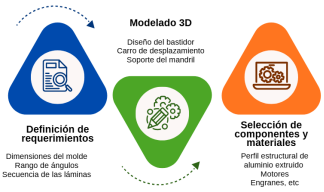


Figura 1. Metodología para el diseño de la máquina de embobinado de filamento

Requerimientos de la Máquina

Tabla1. Elementos y requerimientos principales de la máquina

Elementos	Características
Mandril	Sirve como base sobre la que se enrollan los filamentos
Sistema de giro del mandril	Hace rotar el mandril para permitir el correcto ángulo de colocación de fibras
Sistema de suministro de del filamento	Desenrollar y guiar las bobinas de fibra hacia el mandril
Sistema de impregnación de resina	Asegura que las fibras se impregnen uniformemente con resina
Carro de colocación	Guía las fibras y las coloca sobre el mandril con el ángulo requerido
Sistema de control	Coordina los movimientos del mandril y del carro de colocación

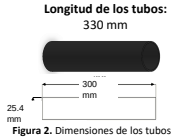


Figura 2. Dimensiones de los tubos

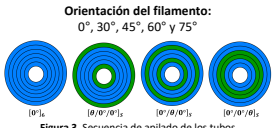


Figura 3. Secuencia de apilado de los tubos

Diseño y Modelado 3D

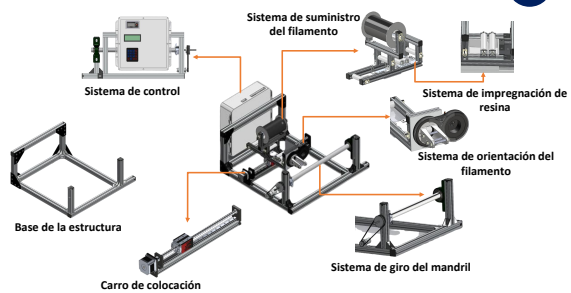


Figura 4. Elementos del diseño de la máquina de embobinado de filamento

Componentes de la Máquina

Tabla 2. Materiales para el diseño de la máquina de embobinado de filamento

Materiales	Características
Perfil de aluminio extruido	30x30 y 20x20
Tapa para perfil de aluminio	30x30 y 20x20
Angulo de ajuste en escuadra	30x30 y 20x20
Unidad de guiado lineal	450 mm
Gabinete de plástico	140 x 190 x
Motor CC	CC 333 RPM
Rodillos de PTFE	500mm, OD18mm-12mm
Ejes de acero	Longitud: 150mm, Diámetro: 6mm
Chumaceras tipo KFL	KFL08 8mm
Juego de poleas con correa de distribución	60T bore 10mm
Mini porta broca de torno de 3 mordazas de metal	3 Jaw Chuck Rod
Recipiente de Silicona Epoxi	8.7cm x 5.7cm x 2.7cm
Angulo de ajuste plano	Tipo L 20x20
Sensor final de carrera	Micro switch limit switch límite fin de carrera

Resultados

- Se realizó el modelado 3D en SolidWorks de la máquina de embobinado de filamento.
- El modelo considera los elementos principales: mandril, sistemas de giro del mandril, de suministro de filamento, de impregnación de resina, carro de colocación y el sistema de control.
- El diseño digital constituye la base para la construcción física y validación experimental del equipo.

Tabla 3. Parámetros principales de la máquina

Parámetro	Valor
Dimensiones	360 x 480 x 260 mm
Rango de ángulos	0° a 75°
Incremento de ángulo	5°
Tipo de control	Manual / Programable
Aplicación	Tubos y cilindros

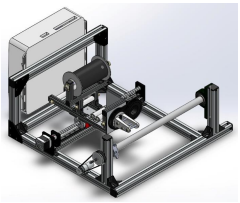


Figura 5. Diseño de la máquina de embobinado de filamento

Tabla 4. Comparación entre una máquina de embobinado convencional y la máquina diseñada para la fabricación de tubos

Características	Máquinas de embobinado convencionales	Máquina de embobinado diseñada
Sistema de impregnación de filamento	El filamento se impregna con resina después del moldeo o mediante baño previo externo, lo que puede generar variaciones en la cantidad de resina.	El filamento se impregna con resina antes del molde, garantizando mayor uniformidad, mejor impregnación y reducción de defectos.
Rango de ángulos de embobinado	Limitado, típicamente entre 10° y 55°, con ajustes mecánicos menos precisos.	Permite ajustar los ángulos de embobinado entre 0° y 75° por capa, ofreciendo mayor versatilidad y precisión.
Tamaño y portabilidad	Equipos grandes y pesados, diseñados para producción industrial.	Diseño compacto (630 × 480 × 260 mm), ideal para laboratorios.
Control del proceso	Ajustes manuales o semiautomáticos, con menor repetibilidad.	Control preciso y estable del ángulo y la velocidad de embobinado, mejorando la reproducibilidad.
Costo	Elevado, debido a su escala industrial y complejidad de componentes.	Alternativa accesible y funcional, adecuada para proyectos de investigación y desarrollo.
Aplicación principal	Producción a gran escala de tubos o recipientes a presión.	Investigación, desarrollo de materiales compuestos y fabricación de prototipos.

Conclusiones

- A diferencia de las máquinas convencionales, el filamento se impregna con resina antes del molde, logrando mayor uniformidad y reducción de defectos.
- El sistema permite ajustar los ángulos de embobinado (0°–75°) en cada capa, ofreciendo más versatilidad que los equipos tradicionales.
- Diseño compacto (630 × 480 × 260 mm), pensado para espacios de laboratorio y prototipado, donde las máquinas comerciales suelen ser demasiado grandes o costosas.
- Garantiza control preciso de ángulos y estabilidad estructural del proceso.
- Se convierte en una alternativa accesible, funcional y adaptable, ideal para investigación y desarrollo de estructuras en materiales compuestos.

Bibliografía

Cui, Z., Liu, Q., Sun, Y., & Li, Q. (2020). On crushing responses of filament winding CFRP/aluminum and GFRP/CFRP/aluminum hybrid structures. *Composites Part B: Engineering*, *200*, 108341. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108341
Dattatray, T., Nikhil, W., Ram, B., Shital, N., & Pankaj, B. (2011). A Review on Design and Development of Filament Winding Machine for Composite Materials . *International Journal of Current Engineering and Technology*. https://doi.org/10.14741/Ijcet/22774106/6.5.2016.20
Gu, H., Liu, C., Zhu, J., Gu, J., Wujcik, E. K., Shao, L., Wang, N., Wei, H., Scaffaro, R., Zhang, J., & Guo, Z. (2018). Introducing advanced composites and hybrid materials. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *1*(1), 1–5. https://doi.org/10.1007/s42114-017-0017-y
Quanjin, M., M.Rejab, M. R., Sahat, I. M., Amiruddin, M., Bachtiar, D., Siregar, J. P., & Ibrahim, M. I. (2018). Design of portable 3-axis filament winding machine with inexpensive control system. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND SCIENCES*, *12*(1), 3479–3493. https://doi.org/10.15282/jmes.12.1.2018.15.0309
Sun, G., Yu, H., Wang, Z., Xiao, Z., & Li, Q. (2019). Energy absorption mechanics and design optimization of CFRP/aluminium hybrid structures for transverse loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, *150*, 767–783. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.043
Zhang, Z., Liu, Q., Fu, J., & Lu, Y. (2023). Parametric study on the crashworthiness of the Al/CFRP/GFRP hybrid tubes under quasi-static crushing. *Thin-Walled Structures*, *192*, 111156. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111156

EVALUACIÓN DINÁMICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA USANDO EL MODELO REDUCIDO ADM1-R4

Josué Rodas Citalán, José Luis Ruiz Maldonado, René Alejandro Flores Estrella
Instituto Tecnológico de Tapachula – El Colegio de la Frontera Sur Unidad Tapachula

Resumen

La digestión anaerobia de aguas residuales transforma materia orgánica en biogás, principalmente metano, contribuyendo a la generación de energía renovable y a la reducción del impacto ambiental. Este estudio implementa la Reducción 4 del modelo ADM1 (ADM1-R4), que simplifica la dinámica del digestor anaerobio manteniendo sus etapas esenciales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Se realizaron simulaciones en MATLAB y Simulink durante 100 días bajo condiciones mesofílicas, evaluando la evolución de biomasa, sustratos y producción de metano ante cambios en el flujo de alimentación. Los resultados muestran estabilidad del sistema frente a variaciones hidráulicas y la capacidad de mantener producción de metano incluso en bajas cargas, validando al ADM1-R4 como herramienta efectiva para análisis y optimización de digestores anaerobios.

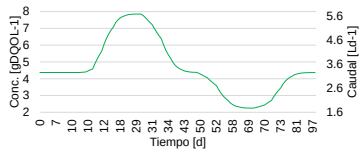
Introducción

El tratamiento de aguas residuales es un desafío ambiental, especialmente en áreas urbanas e industriales con alta generación de contaminantes orgánicos. La digestión anaerobia permite degradar la materia orgánica en ausencia de oxígeno y producir biogás, principalmente metano, como fuente de energía renovable. Sin embargo, la complejidad del proceso, mediado por consorcios microbianos y factores físico-químicos, dificulta su comprensión y optimización. Los modelos matemáticos, como el Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1), permiten describir cuantitativamente estos sistemas, pero su alta complejidad computacional limita su aplicación. Para superar estas barreras, Weinrich & Nelles (2021) propusieron cuatro versiones reducidas del ADM1, R1 a R4, que simplifican el modelo manteniendo las etapas esenciales del proceso. Este estudio implementa y simula únicamente la reducción R4 (ADM1-R4), evaluando la dinámica de biomasa, sustratos y producción de metano en un digestor anaerobio mesofílico. El objetivo principal es validar la capacidad de este modelo reducido para representar la digestión anaerobia, ofreciendo una herramienta eficiente para el análisis, enseñanza y optimización de procesos de tratamiento de aguas residuales.

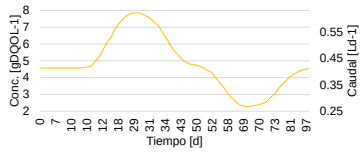
Metodología

Se implementó la Reducción 4 del modelo ADM1 (ADM1-R4) para simular la digestión anaerobia de aguas residuales. Primero, se revisó literatura especializada y los libros de Metcalf & Eddy (1995, 2014) para seleccionar la versión más adecuada. El modelo conserva las etapas clave —hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis— con menor complejidad computacional, y se ejecutó en MATLAB y Simulink resolviendo las ecuaciones diferenciales acopladas.
Las simulaciones abarcaron 100 días en un digestor mesofílico (37 °C) con 100 L de fase líquida y 10 L de fase gaseosa. Se evaluaron distintos caudales de alimentación para observar el efecto del tiempo de retención hidráulica sobre la estabilidad del sistema y la producción de metano. Los resultados se analizaron mediante gráficas de evolución temporal de biomasa y sustratos, identificando patrones de comportamiento y regiones de equilibrio. Este enfoque permite un análisis eficiente y reproducible, demostrando la utilidad del ADM1-R4 como herramienta simplificada para estudiar la digestión anaerobia.

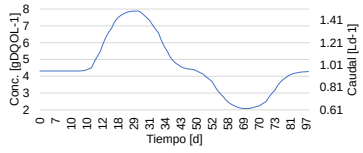
Resultados



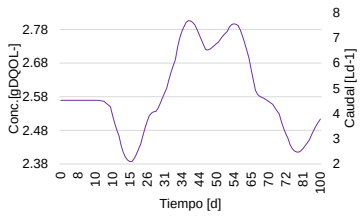
Dinámica de los carbohidratos particulados (X_ch).



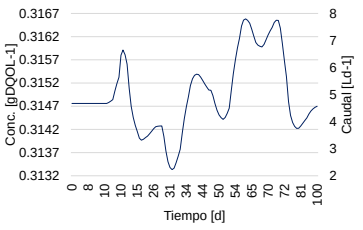
Dinámica de los lípidos (X_li).



Dinámica de las proteínas solubles (S_pr).



Evolución de la biomasa bacteriana (X_bac) durante 100 días de simulación.



Producción de metano en fase gaseosa (Sgas_CH_4).

La simulación del modelo ADM1-R4 durante 100 días evidenció la sensibilidad del digestor a cambios en el régimen hidráulico. La biomasa bacteriana se mantuvo estable a 4 Ld^{-1}, pero disminuyó a 8 Ld^{-1} por reducción del TRH, indicando el inicio de *wash-out*. Al volver a 4 Ld^{-1}, la biomasa se recuperó, confirmando la relación directa entre TRH y estabilidad microbiana.

Los sustratos mostraron respuestas diferenciadas: los carbohidratos particulados fueron los más afectados, acumulándose por limitaciones en la hidrólisis; los lípidos se incrementaron bajo sobrealimentación y se degradaron con mayor TRH; mientras que las proteínas solubles presentaron variaciones moderadas. Estos resultados indican que cargas elevadas intensifican la acumulación de sustratos y comprometen la estabilidad del proceso.

La fase gaseosa reflejó la eficiencia del sistema: el metano disuelto permaneció casi constante, mientras que el metano acumulado respondió al TRH, alcanzando su máximo con bajo caudal y estabilizándose al retornar a condiciones intermedias.

Aunque el modelo reducido no representa fenómenos como inhibiciones específicas, permite analizar de forma clara las tendencias globales, validando su utilidad como herramienta computacional para la optimización de digestores anaerobios.

Conclusiones

El estudio demostró que el modelo reducido ADM1-R4 es una herramienta eficaz para simular la digestión anaerobia bajo diferentes regímenes hidráulicos. A pesar de su estructura simplificada, el modelo logró reproducir con precisión la dinámica de biomasa, sustratos y gases, capturando fenómenos clave como la relación entre el tiempo de retención hidráulica y la estabilidad microbiana, así como la acumulación de sustratos bajo condiciones de sobrecarga.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en estudios previos, confirmando que la reducción de parámetros y poblaciones microbianas no compromete la capacidad predictiva en escenarios de simulación global. Esta característica convierte al ADM1-R4 en una alternativa práctica para análisis preliminares, diseño de estrategias de operación y aplicaciones académicas, reduciendo el esfuerzo computacional respecto al ADM1 completo.

Como línea futura, se plantea extender las simulaciones hacia condiciones de inhibición por compuestos críticos (amoníaco, ácidos grasos volátiles) y explorar su validación experimental en sistemas a escala piloto. Esto permitirá consolidar el modelo como un recurso valioso no solo en la investigación, sino también en el desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía renovable.

Referencias

1. Angenent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Wrenn, B. A., & Domíguez-Espinosa, R. (2004). Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 22, Issue 9, pp. 477–485). https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.07.001
2. Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V, Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*.
3. Flores-Estrella, R., Quiroz, G., Mendez-Acosta, H. O., & Femat, R. (2013). H ∞ control of anaerobic digester for winery industry wastewater treatment. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *52*(7), 2625–2632. https://doi.org/10.1021/ie302233t
4. Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (Tchobanoglous George, Stensel H. David, Tsuchihashi Ryujiro, Burton Franklin, Abu-Orf Mohammad, Bowden Gregory, & Pfrang William, Eds.; 5th ed.). McGraw Hill Education.
5. Weinrich, S., & Nelles, M. (2021). Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) – Model development and stoichiometric analysis. *Bioresource Technology*, *333*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125124

PÓSTER

DIVULGACIÓN

Encaminándonos a un ambiente más limpio: Síntesis verde

Reyes Cruz María Guadalupe*, García Rodríguez Nayeli Lizeth*
* Instituto Tecnológico de Toluca.

Introducción

La síntesis verde o biosíntesis utiliza compuestos naturales que se encuentran en las plantas, raíces, hongos, crustáceos, entre otros; al utilizarlos, los compuestos fitoquímicos que contienen pueden ser extraídos y utilizados en los métodos de síntesis para sustituir a los agentes reductores y estabilizantes, logrando de esta forma ser más amigables con el ambiente.

Entre los materiales sintetizados se encuentran las nanopartículas metálicas, materiales en escalas de $1x10^{-9}$ m, en al menos una de sus dimensiones, esto quiere decir que el ojo humano no lo puede detectar. El tamaño, la morfología y el medio en el que se encuentran les brindan su color y espectro característico. Por ejemplo, el oro en tamaños nanométricos puede ser morado o rosa.

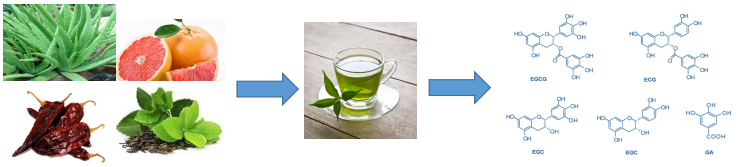
Contenido principal

En el presente trabajo se menciona la síntesis de nanopartículas metálicas utilizando extractos de plantas, la cual se obtiene al añadir las hojas en agua u otro solvente y posteriormente infusionar o aumentar la temperatura de agua hasta ebullir.

Los extractos de plantas tienen ciertos compuestos que ayudan a obtener estas nanopartículas, ocurre cuando les ceden electrones a los iones metálicos posteriormente funcionan como redes para impedir su crecimiento y mantengan sus escalas nanométricas, a este proceso se le denomina reducción−oxidación.

Dentro de las propiedades de estos materiales, se encuentran las ópticas, que tienen un fenómeno característico llamado la resonancia de plasmones de superficie (SRP).

La fruta y hojas contienen compuestos polifenólicos



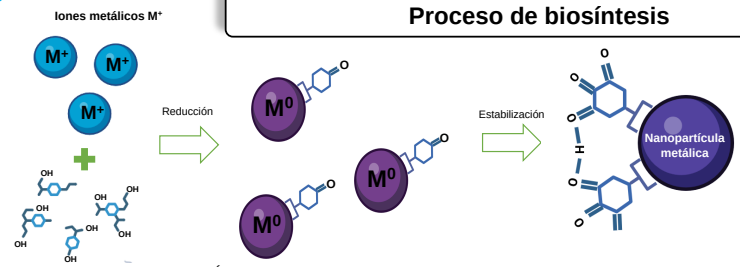
Plantas, semillas y raíces son utilizadas para obtener extractos que contienen grupos polifenólicos

Los extractos contienen compuestos fenólicos conformados por anillos aromáticos con uno o más grupos hidroxilo (OH^-).

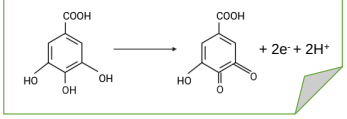
Por ejemplo en las hojas, cuando se aumenta la temperatura del solvente, se rompe la pared celular y debido a la gran solubilidad de los polifenoles, su migración se facilita hacia el medio acuoso.

Los compuestos polifenólicos pueden actuar como agentes reductores y estabilizantes.

Proceso de biosíntesis



Esto ocurre en el proceso de reducción:
Oxidación de dos electrones de un ácido gálico a su correspondiente forma quinona (doble enlace)

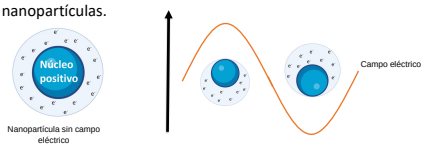


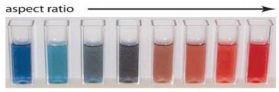
Las propiedades ópticas de estos materiales se analizan con la espectroscopía ultravioleta-visible, por medio de la cual la luz interactúa con la solución que contiene a las nanopartículas, el resultado es una banda característica a cada material, las bandas se modifican por la morfología, el tamaño o el medio en el que se encuentren.

Resonancia del plasmón

La nanopartícula se considera como un núcleo positivo rodeado por una nube de electrones.

Cuando la luz interactúa, con el material, estos electrones (plasmones de superficie) se mueven en sentido opuesto al campo eléctrico, proporcionando información sobre las nanopartículas.





El color del oro cambia dependiendo del tamaño y la morfología. Normalmente se ve dorado, pero en tamaño nanométrico puede ser rojo, rosa, morado o azules.

Mensaje final

Implementar el uso de organismos naturales para obtener nanomateriales, nos permite ser amigables con el ambiente debido a que los desechos son fáciles de tratar, así también en algunos casos podemos utilizar residuos lo que nos permite, darle un segundo uso a las cascaras, hojas, tallos y huesos en el caso de ser plantas o extractos de ellas.

Por lo que la síntesis verde nos permite no contaminar con los precursores, y buscar la estabilidad entre el ambiente y la tecnología.

"Para saber más"

- Khan, Y., Sadia, H. (2022). Classification, Synthetic, and Characterization Approaches to Nanoparticles, and Their Applications in Various Fields of Nanotechnology: A Review. Catalysts, 12(11), 1386. Https://doi.org/10.3390/catal12111386.
- Edelstein, A., & Cammaratra, R. (1998). Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications, Second Edition. CRC Press.
- Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. Repertorio de Medicina y Cirugia/Repertorio de Medicina y Cirugía, 27(2). Https://doi.org/10.31260/repertmedcir.v27.n2.2018.191

Fármacos ¿amenaza ambiental? Fotocatálisis y el diseño de nanomateriales para una solución sustentable

Deni Blanca Soriano Rodríguez *, Luis Antonio García Contreras *, Rafael Guillermo Suárez Nájera *, José Ocotlán Flores Flores**, José Álvaro Chávez Carvayar

* Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, México City.
**Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, México City.

Introducción

Los medicamentos son esenciales para la atención de diversas enfermedades, se utilizan para prevenir, diagnosticar, tratar o aliviar enfermedades. Sin embargo, en los últimos años, se ha hecho evidentes su consumo desmedido, lo que ha provocado una importante contaminación y dañado al medio ambiente; recientemente, se les ha catalogado como contaminantes emergentes. Si bien aún no existe una regulación ambiental para los fármacos o sus metabolitos por encontrarse en bajas concentraciones, existe una gran preocupación por el efecto que puedan tener en el ecosistema o en las personas por la exposición continua a la que se ven expuestos.

¿Qué son los Contaminantes Emergentes?

Son sustancias químicas sintéticas o naturales cuyo incremento o daño a los ecosistemas, pero pueden tener efectos adversos en los organismos vivos y en el medio ambiente.

¿De dónde vienen y qué contaminan?

El principal foco de acumulación son las aguas residuales urbanas y contaminan los mantos acuíferos, ya que no se eliminan por tratamientos convencionales, son tóxicos, se acumulan fácilmente, causan efectos adversos en el medio ambiente y la salud.

¿Qué solución hay para el problema?

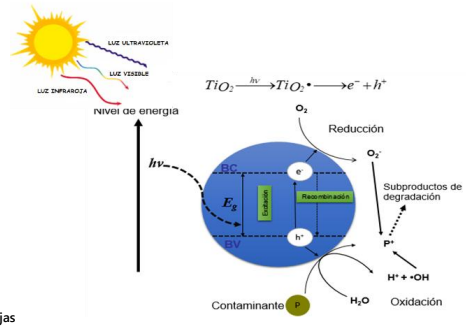
Si bien existen varios métodos de remoción de los contaminantes emergentes como los fármacos estos los remueven de manera parcial, y como consecuencia, el problema se agrava por su acumulación en el ecosistema. Una alternativa sustentable es la fotocatálisis, técnica útil en la degradación o eliminación de los contaminantes emergentes e implementada en el tratamiento de agua; cuya eficiencia se ha incrementado por la mejora en el uso de nuevos materiales nanoestructurados.

¿Sabías qué?

Cualquier contaminante que esté en el ambiente aún en cantidades muy pequeñas daña nuestro organismo, ya sea por el consumo de agua o el consumo de alimentos de origen vegetal o animal.

¿Qué es y cómo se usa la fotocatálisis?

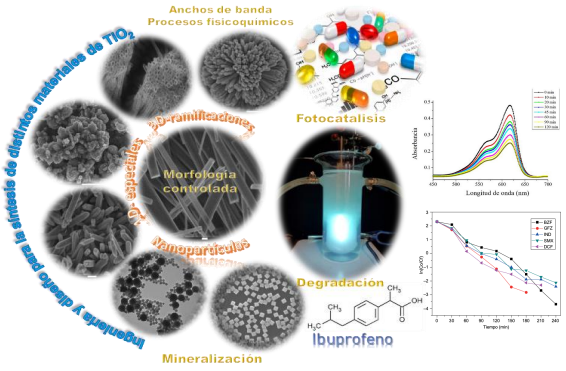
Una posible y viable solución son los Proceso de Oxidación Avanzada como la fotocatálisis. La fotocatálisis es un proceso químico en el que mediante la absorción de luz se acelera una reacción química por medio del uso de un fotocatalizador (generalmente un semiconductor), proceso en el cual se generan especies químicas con alto poder oxidante mediante el uso de un fotocatalizador como el dióxido de titanio, este proceso puede usar una fuente de luz (solar o artificial) y generar radicales hidroxilo (•OH), que son especies muy oxidantes, lo cual rompe los fármacos en componentes más simples y menos tóxicos.



Ventajas
Permite la degradación total o parcial del contaminante emergente.
Puede utilizar energía solar lo que lo hace un método sustentable.

¿Cómo podemos mejorar?

Una estrategia importante para la mejora de los fotocatalizadores es la ingeniería y diseño de nanomateriales para su aplicación en fotocatálisis, esto se basa en mejorar los fenómenos fisicoquímicos de los materiales por medio del control de morfologías nanométricas y cambios estructurales; los cuales también pueden mejorar la eficiencia del material al utilizar la luz solar.



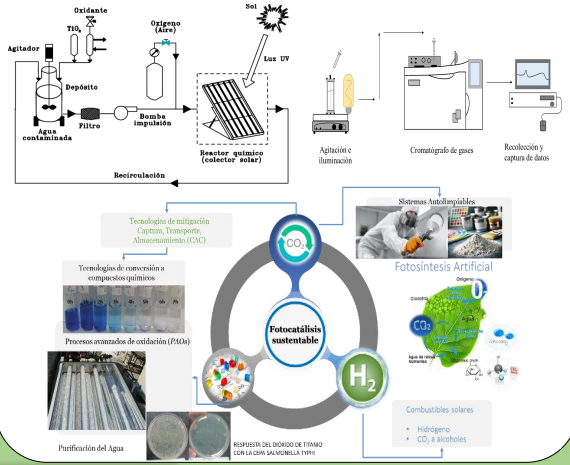
Los fotocatalizadores como el TiO_2 son económicos y estables químicamente; además de que pueden ser modificados por métodos de síntesis amigables con el medio ambiente.

"Queremos que esos contaminantes orgánicos como los fármacos se transformen en CO_2, un proceso conocido como mineralización para así limpiar los cuerpos de agua"

Otras aplicaciones en la vida cotidiana

La fotocatálisis y la ingeniería y diseño de nanomateriales, tambien se aplican en otros aspectos de nuestra vida diaria como:

- En la purificación del aire y del agua y en el tratamiento de residuos
- Descomponen contaminantes y desactivan patógenos
- En el uso de máscaras, ropas con recubrimientos activos y superficies autolimpiables
- En la producción de hidrógeno como fuente de energía limpia.



Conclusiones

Los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los materiales utilizados en fotocatálisis, mediante la ingeniería y diseño de materiales nanométricos, pueden proporcionar ventajas y mejoras en los procesos de fotocatálisis heterogénea para la degradación de fármacos y otros procesos de degradación, remediación ambiental y obtención de energías limpias. Estas propiedades pueden variar de acuerdo al diseño estructural, tamaño y morfología y, los cambios, pueden ser logrados al modificar algunos parámetros en los métodos de síntesis para modular las propiedades que permitan una mejor eficiencia de estos materiales y, así, poder emplearlos en otros tipos de aplicaciones para la remediación ambiental y la producción de energía.

Para saber más

Pueden visítenos en los Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM) e Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT-UNAM); donde podrán conocer sus distintos laboratorios para la síntesis y caracterización de materiales como el Laboratorio de Nuevos Materiales Cerámicos Nanoestructurados (NUMACEN), el Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica (LUME), el Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) y el Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental (LUNA).

Microplásticos Atmosféricos: Implicaciones en el Cuerpo Humano

María Inés Mota Gómez[1*], Isabel Araceli Amaro Espejo[1*], María del Refugio Castañeda Chávez[1*], Paula Zúñiga Ruiz[1*], Fabiola Lango Reynoso[1*].
[1*] Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Boca del Río

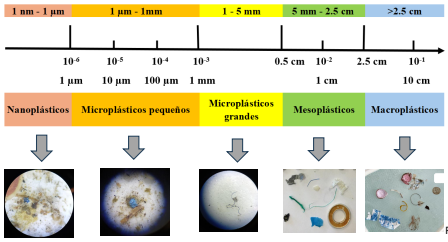
Introducción

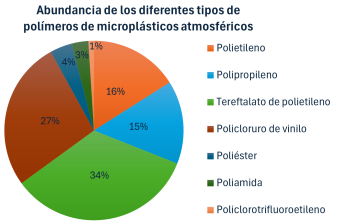
Los microplásticos atmosféricos son partículas plásticas suspendidas en el aire que tienen un tamaño menor a 5 mm y se originan a través de la degradación de plásticos más grandes, radiación UV, desecho inadecuado y abrasión física (NOAA, 2005). Debido a su tamaño generan mayor abundancia, facilidad para transportarse, lo que los convierte en un contaminante para la población. Pueden estar presentes en fibras textiles, cosméticos, pintura o aerosoles, tráfico vehicular, industrias de plásticos y materiales de construcción (Allen et al., 2019)
El viento, la lluvia y la brisa marina los transporta globalmente, llegando así, al aire que inhalamos. Esto representa una nueva frontera de riesgo para la salud pública.

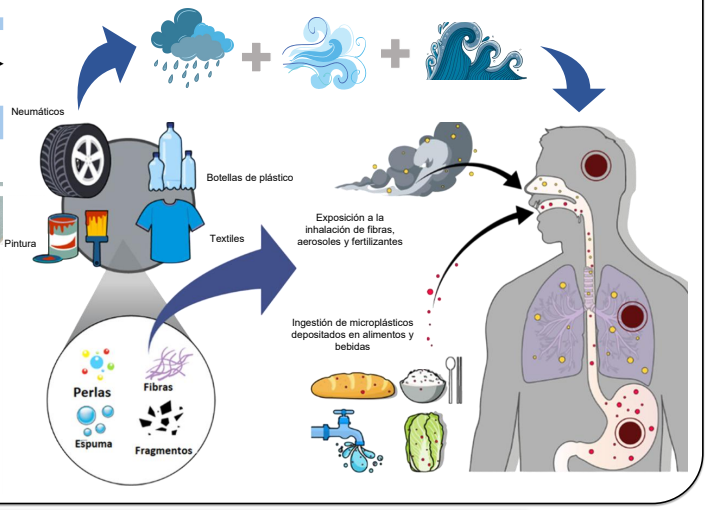
Efectos en el cuerpo humano

Estudios recientes confirman que los microplásticos flotan en el aire que respiramos, tanto en la calle como dentro de nuestras casas, y cuando los inhalamos pueden llegar hasta lo más profundo de nuestros pulmones e incluso pasar al cerebro. Estos plásticos diminutos, podrían ser vectores de sustancias tóxicas como metales pesados y microorganismos patógenos.
Se han detectado en diversos tejidos y fluidos, como pulmones, sangre, placenta, leche materna, testículos y líquido folicular. Su presencia se asocia con efectos adversos para la salud, incluyendo inflamación pulmonar persistente, estrés oxidativo, genotoxicidad y posibles alteraciones en la fertilidad tanto masculina como femenina (Tomonaga et., 2024).

Dinámica de los microplásticos en el ambiente







¿Cómo se encuentran los microplásticos en nuestra atmósfera?

La exposición a los microplásticos en la atmósfera resulta una tarea complicada. Por ejemplo, al colgar nuestra ropa sintética después de lavar, el viento impacta con la tela que desprende microfibras y se mezclan en el ambiente. En nuestra rutina diaria, mientras caminamos en la calle, respiramos micropartículas plásticas desprendidas de las llantas de automóviles, de la misma manera que al a hacer ejercicio al aire libre o cuando usamos el transporte público en hora pico. En nuestras decisiones de consumo diario, podemos encontrar microperlas en los productos de belleza, envases de plástico de un solo uso y en la compra de ropa sintética. Sin embargo, aún no existe una normatividad diseñada para supervisar la emisión de microplásticos.

Conclusión

Los microplásticos atmosféricos son un componente omnipresente de la contaminación atmosférica con implicaciones directas en nuestra salud respiratoria y sistémica. La solución requiere un esfuerzo colectivo, que va desde políticas públicas que reduzcan la producción del plástico, hasta decisiones individuales informadas como reducir plásticos de un solo uso, utilizar transporte público o comprar fibras naturales. Conocer el problema es el primer paso para respirar un aire más limpio.

Para saber más…

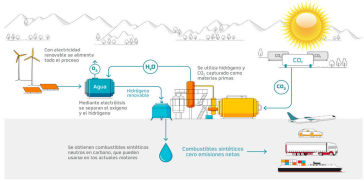
Ageel HK, Harrad S, Abdallah MA. Microplastics in indoor air from Birmingham, UK: Implications for inhalation exposure. Environ Pollut. 2024 Dec 1;362:124960.
Islam MZ, Zaman SU, Sami NI, Roy S, Jeba F, Islam MS, Salam A. Human inhalation exposure assessment of the airborne microplastics from indoor deposited dusts during winter in Dhaka, Bangladesh. Heliyon. 2024 Aug 17;10(16):e36449.
Mehmood T, Hassan MA, Faheem M, Shakoor A. Why is inhalation the most discriminative route of microplastics exposure? Environ Sci Pollut Res Int. 2022 Jul;29(33):49479-49482.
Tomonaga T, Higashi H, Izumi H, Nishida C, Kawai N, Sato K, Morimoto T, Higashi Y, Yatera K, Morimoto Y. Investigation of pulmonary inflammatory responses following intratracheal instillation of and inhalation exposure to polypropylene microplastics. Part Fibre Toxicol. 2024 Aug 6;21(1):29.
Torres-Agullo A, Karanasiou A, Lacorte S. Nasal lavage technique reveals regular inhalation exposure of microplastics, not associated from face mask use. Environ Int. 2023 Aug;178:108129.

Cuando el sol se vuelve combustible: Estrategia de control e innovación solar desde el sur de Morelos

Johanna Xitlally Ochoa Tenorio, Marisol Cervantes Bobadilla, Jarniel García Morales, Vicente Borja Jaimes
Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Introducción

Los **combustibles sintéticos solares** son **hidrocarburos obtenidos sin petróleo**, a partir de **CO_2 y H_2O**. El proceso comienza con la **producción de gas de síntesis (syngas: H_2 + CO)**, que actúa como **intermedio** para luego transformarse en **combustibles** (p. ej., **queroseno, diésel sintético, metanol-a-combustibles**).
Una ruta viable usa **energía solar de concentración (CSP)**, capaz de aportar **más de 1 200°C**, con la que se generan corrientes de **syngas(≈50–60 % H_2)** y se **reduce la huella de CO_2 hasta ~90%** frente a rutas fósiles. Zonas con alta **irradiancia**, como el **sur de Morelos**, favorecen esta vía hacia **combustibles solares**.



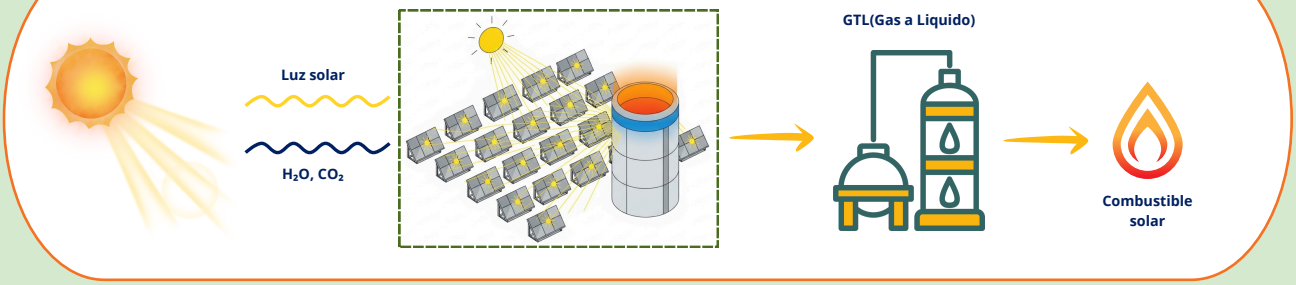
El poder del Sol impulsa el potencial solar en Morelos

La **energía solar concentrada** aprovecha la luz del Sol mediante espejos o lentes que **concentran su energía** para alcanzar **temperaturas superiores a 1,200 °C**, para realizar **procesos termoquímicos** capaces de generar **combustibles solares**, una alternativa limpia y renovable frente a los combustibles fósiles.

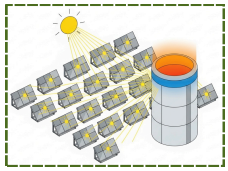
En **México**, el potencial solar es enorme, y el **sur del estado de Morelos** destaca por su **alta irradiancia**, lo que lo convierte en una zona ideal para impulsar el desarrollo de este tipo de proyectos.

Resulta importante **orientar los estudios hacia configuraciones de concentración solar** aplicables a esta región, y **establecer estrategias de control** que permitan **regular la potencia térmica de los concentradores**, con la finalidad de **maximizar** el aprovechamiento de la **radiación solar** disponible.

Propuesta para una estrategia de control para un sistema de concentración solar



Estrategia de Control: Anticipando al Sol



Se propone implementar una **estrategia de control** para regular la potencia térmica del sistema de concentración solar. Este enfoque utiliza un modelo matemático del concentrador y predicciones de irradiancia solar para **anticipar variaciones del recurso solar** y **ajustar la operación en tiempo real** en el sur del estado de Morelos.

Aplicaciones e Impacto en Nuestro Entorno

Comunidades aprovechando la irradiancia de Morelos para generar energía limpia.

Aviones impulsados por combustibles solares.

Fábricas que utilizan energía solar en lugar de gas natural.

Mensaje final

El Sol puede ser el combustible que impulse la tecnología del futuro.

Referencias "Para saber más"

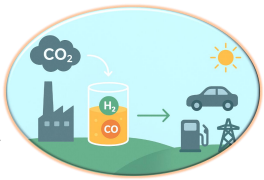
Abanades, S., Rodat, S., & Boujjat, H. (2021). Solar thermochemical green fuels production: A review of biomass pyro-gasification, solar reactor concepts and modelling methods. Energies, 14(5), 1494.
Alcántara, A., Diaz-Cachinero, P., Sánchez-González, A., & Ruiz, C. (2025). Leveraging neural networks to optimize heliostat field aiming strategies in Concentrating Solar Power Tower plants. Energy and AI, 100520.
Pargmann, M., Ebert, J., Quinto, D. M., Pitz-Paal, R., & Kesselheim, S. (2024). Automatic Heliostat Learning for In-situ Concentrating Solar Power Plant Optimization with Differentiable Ray Tracing.

Del Dióxido de Carbono a la Energía Limpia

Jesus Asael Domínguez Cortes*, Marisol Cervantes Bobadilla*, Jarniel García Morales*, Emmanuel Olmos Barba*, Vitervo López Caballero*
*Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Introducción

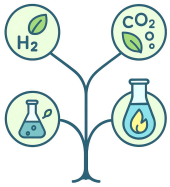
El uso de combustibles fósiles ha impulsado durante décadas el desarrollo industrial y económico, pero también ha generado un aumento preocupante en las emisiones de CO_2, uno de los principales problemas del cambio climático.
Para enfrentar este problema, se busca aprovechar la transformación de CO_2 en energía limpia, mediante procesos como la producción del gas de síntesis o "*syngas*".



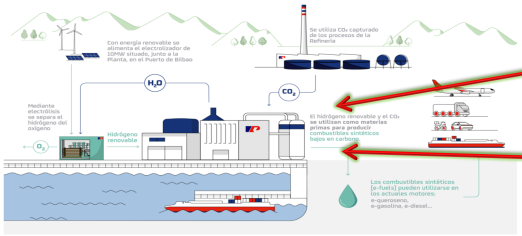
Gas de síntesis : energía limpia para el futuro

El **gas de síntesis (*syngas*)** es una mezcla de **H_2** y **CO** que sirve como base para producir **combustibles sintéticos**.

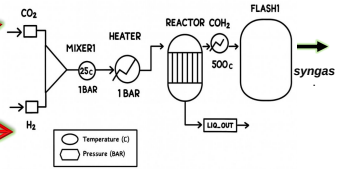
Entre sus rutas de obtención destaca la Reacción Inversa de Desplazamiento de Gas de Agua (RWGS), que transforma CO_2 en CO en presencia de H_2 y calor: $CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$.
El aporte térmico puede provenir de energía solar o eólica, facilitando esquemas de aprovechamiento de CO_2 en cadenas de valor de combustibles de menor huella de carbono [1].



Importancia del gas de síntesis y principales desafíos



El uso del CO_2 capturado y energías renovables en la producción del gas de síntesis reduce el impacto ambiental.
Este enfoque permite generar combustibles de emisiones neutras ya que el CO_2 emitido es el mismo que se capturó para producirlos.
Además, el gas de síntesis se puede utilizar también para generar otros compuestos como metanol, diésel sintético o queroseno sostenible, sustituyendo así los combustibles fósiles.



El rendimiento del proceso de reacción de desplazamiento de gas de agua (RWGS) depende de múltiples variables que influyen en la conversión y calidad del gas producido.

Principales desafíos en la producción de gas de síntesis:
- **Rendimiento del proceso (conversión y selectividad).**
- **Aporte térmico de origen renovable.**
- **Captura y pureza de CO_2.**

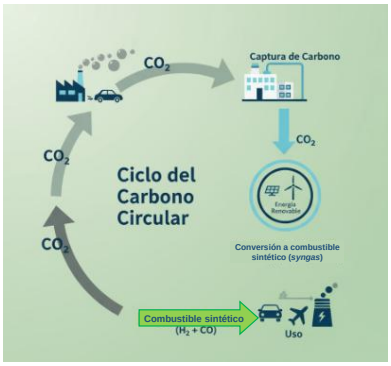
Este estudio se centra en identificar y gestionar las variables del reactor RWGS que determinan la obtención de *syngas*.

Variables a analizar en el reactor:
- **Temperatura: entre 400 y 600 °C**
- **Presión (bar) entre 1, 5 y 10**
- **Relación molar H_2/CO_2**
- **Alimentación de CO_2**
- **Hidrógeno verde H_2**

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana

La propuesta se vincula con la necesidad de reducir emisiones contaminantes, diversificar fuentes de energía y fortalecer la seguridad energética.
De manera más amplia, la investigación apoya el desarrollo de soluciones sostenibles que inciden en la transición hacia una economía menos dependiente de los combustibles fósiles, en beneficio de la sociedad y del medio ambiente.

¿Sabías que los combustibles sintéticos pueden considerarse de emisiones neutras?



Esto se debe a que el **carbono liberado durante su combustión** ya fue **capturado previamente** del CO_2 presente en la atmósfera.
De esta manera, se mantiene un **ciclo cerrado del carbono**, donde las emisiones generadas se compensan con el CO_2 reutilizado en su producción, **evitando aumentar la cantidad total de gases de efecto invernadero**.

Conclusión

El proceso de la reacción de desplazamiento de gas de agua permite transformar CO_2 en *syngas* usando H_2 verde y calor de fuentes renovables.

El punto clave es gestionar las variables críticas del reactor (temperatura, presión, relación H_2/CO_2 y caudal de CO_2) para mantener conversión estable y buena calidad del gas.

Con un control adecuado de estas variables, el proceso reaprovecha CO_2 y habilita combustibles sintéticos con menor huella de carbono.

"Para saber más"

1. De, C., & México, D. E. (s/f). Org.mx. Recuperado el 12 de noviembre de 2025, de https://cipm.org.mx/media/yspeeuxe/revista_diciembre_2021.pdf
2. Perrusquia, A. (2025, enero 20). Cómo Syngas está allanando el camino hacia un futuro sostenible. *Ciencia Acelerada*. https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/mineria/como-syngas-esta-allanando-el-camino-hacia-un-futuro-sostenible/
3. *Vista de Producción de gas de síntesis a partir de CO2 residual de la industria sucroalcoholera: un enfoque basado en simulación de procesos*. (s/f). Edu.ar. Recuperado el 12 de noviembre de 2025, de https://revistas.unlp.edu.ar/JAIIO/article/view/19477/19510

Educación Ambiental para el Futuro: Misión Net Zero 2050

Jocelyn Damaris Sevilla Pinzón, Santiago Fabrizzio de Jesús Ocampo Vergara*, Daniela Hernández Castañeda *, **Mónica Borunda Pacheco.*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.*

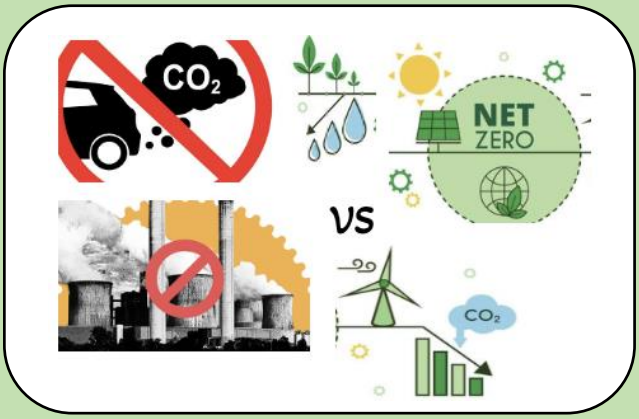
***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - SECIHTI*

Introducción

Los informes del IPCC muestran que a partir de 1,5 °C los impactos climáticos (olas de calor, pérdida de glaciares, acidificación oceánica, sequías) aumentan exponencialmente. Para evitar esto, el Acuerdo de París busca limitar el calentamiento global por debajo de 2 °C y, preferentemente, de 1,5 °C (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, s.f.).

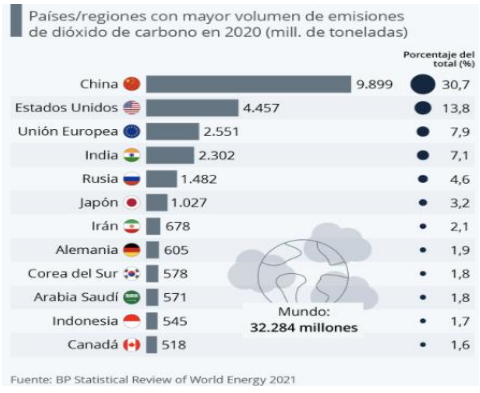
Para tener una probabilidad del 50% de mantener el aumento de la temperatura global promedio por debajo de los 1.5°C es necesario una reducción del 45% de las emisiones de CO_2 para 2030 y la neutralidad total de carbono en 2050. Por lo que surge el Net Zero 2050 (Naciones Unidas, s.f.).

Por ello, la Educación Ambiental es clave para apoyar la meta del Net Zero 2050. Diseñar recursos didácticos y generar conciencia ambiental desde temprana edad es una herramienta para construir un futuro más sostenible (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2024).



Contenido principal

- **¿Qué es el Net Zero 2050?** Es una estrategia global que busca que, para 2050, las emisiones de gases de efecto invernadero sean iguales a las que se eliminan o compensan.
- **Propósito del Net Zero 2050:** Alcanzar la descarbonización para el año 2050.
- **Principales países emisores de gases de efecto invernadero:** China, Estados Unidos de América, India, la Unión Europea, Indonesia, la Federación Rusa y Brasil.
- **Papel que juega la educación:** Fomentar la conciencia sobre Net Zero 2050 en las escuelas motiva a jóvenes y futuras generaciones a adoptar acciones sostenibles, como el uso de energías renovables.



¿Sabías que…?

El estado de Morelos posee una gran riqueza biológica en proporción a su territorio (4,560 km²). Muchas comunidades dependen del aprovechamiento de los recursos naturales. Estudios muestran que los programas impartidos a edad temprana fomentan de manera más efectiva actitudes positivas hacia el medio ambiente (Pineda Jiménez, C., López Medellín, & Maldonado Almanza, B., 2018).

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

- **Participación ciudadana:** Los ciudadanos participan activamente en iniciativas para resolver problemas ambientales.
- **Combate el calentamiento global:** Se crea conciencia sobre los riesgos del incremento de la temperatura global y se promueven acciones más sostenibles.
- **Escuelas más verdes y sostenibles:** Jardines y programas de reciclaje fomentan un entorno respetuoso con el medio ambiente.
- **Futuras generaciones con conciencia ambiental:** Formar agentes de cambio que contribuyan a un mundo más sostenible.

Mensaje final

La educación ambiental es una herramienta esencial para construir una sociedad más consciente, responsable y comprometida con el cuidado del planeta.
Fomentar esta educación desde edades tempranas es clave para un mundo sostenible.

¡Nuestro recurso didáctico es un primer paso para empoderar a los jóvenes de Morelos en esta transición!".

Referencias

1.Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (s.f.). El Acuerdo de París. https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris

2.Naciones Unidas. (s.f.). *Net Zero Coalition*. https://www.un.org/es/climatechange/net-zero-coalition

3.Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2024, 26 de enero). *Educación Ambiental: conocimiento y acción para salvaguardar el planeta*. https://www.gob.mx/imta/articulos/educacion-ambiental-conocimiento-y-accion-para-salvaguardar-el-planeta

4.Pineda Jiménez, C., López Medellín, X., Wehncke, E. V., & Maldonado Almanza, B. (2018). Construir sociedades comprometidas con el entorno natural: educación ambiental en niños del sur de Morelos, México. Región y sociedad, 30(72). https://doi.org/10.22198/rys.2018.72.a896

EVALUACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO MEDIANTE RUIDO ELECTROQUÍMICO.

Omar Alejandro González Noriega *, Laura Monserrat Alcántara Martínez**
* Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
** Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, UPALM.

Resumen

A partir de esta investigación se evaluó el efecto protector contra la corrosión de un recubrimiento vinil acrílico aplicado a un acero al carbón evaluado en una solución que simula corrosión atmosférica marina e industrial (0.1M Na_2SO_4+3%wt NaCl), mediante la técnica de ruido electroquímico (EN) para determinar la velocidad de corrosión, tipo de corrosión y mecanismo de corrosión. Los resultados muestran que al aplicar el recubrimiento este vuelve más activo al material, no obstante, se forman productos de corrosión los cuales tienden a disminuir la densidad de corriente, el tipo de corrosión que presenta el recubrimiento es de tipo localizada.

Introducción

La corrosión es el deterioro de un metal por su interacción con el medio en el cual se encuentra, su velocidad dependerá del material y el medio en el cual se encuentre expuesto. La corrosión tiene un impacto contundente ya que no solo se basa en perdidas económicas, sino también puede causar daños ambientales e inclusive hasta perdidas humanas. Algunos casos de estudio de la corrosión son: La industria petrolera, automotriz, maquinaria, alimentaria, biomedical, aeroespacial, entre otras.

La técnica de ruido electroquímico por sus siglas en ingles (EN) es de primordial importancia en el campo de ingeniería en corrosión, ya que esta técnica permite determinar el tipo de corrosión, mecanismo y velocidad. Además, de que es la única técnica que sirve para determinar la velocidad de corrosión cuando es del tipo localizada. Para el tratamiento de los datos de ruido electroquímico existen diferentes métodos, como: el método estadístico (dominio del tiempo), mediante la transformada de Fourier (dominio de la frecuencia), transformada de Hilbert Huang (dominio de tiempo-frecuencia, etc.

Metodología

Para las pruebas de ruido electroquímico (EN), se realizan series de tiempo de 1024 puntos por segundo, de acuerdo con la Norma ASTM G199.

Las muestras utilizadas fueron cilindros de acero 1018 encapsulado con resina epoxica, estas se desbastaron con lijas de carburo de silicio de grano 120 hasta 600. Finalmente fueron lavadas con acetona y almacenadas en un disecador para su posterior uso. En este caso de estudio se evalúa un recubrimiento vinil acrílico de intemperie, este fue elaborado en el CIICAp-UAEM.

Método estadístico aplicado:

Remoción de la tendencia

$$x_n = x_2 - x_1$$

Raíz cuadrática media:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n}}$$

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2}{n-1}}$$

Resistencia al ruido electroquímico (Rn)

$$R_n = \frac{\sigma_v}{\sigma_i}$$

Índice de localización (LI):

$$LI = \frac{\sigma_i}{I_{rms}}$$

Resultados

Serie de ruido en corriente

De acuerdo con los resultados obtenidos de la Fig.1. A las 0h se puede observar que material base presenta transitorios de gran intensidad lo que es atribuido a ataques localizados en el material a lo largo de la prueba, para las 96 h la densidad de corriente disminuye, sin embargo se visualiza un mayor numero de transitorios de mayor intensidad un mayor numero de fluctuaciones, esto indica un mayor numero de sitios localizados, pero de menor profundidad. Para el caso del material con el uso del recubrimiento a las 0 h se visualiza como su densidad de corriente es similar, no obstante, presenta un menor numero de fluctuaciones y transitorios debido al efecto de recubrimiento, para las 96 hora su velocidad de corrosión disminuye dos ordenes de magnitud con respecto a las 0 h (R), pero presenta un mayor numero de fluctuaciones y transitorios de mayor intensidad con respecto a 0 h, esto es debido al picado del recubrimiento.

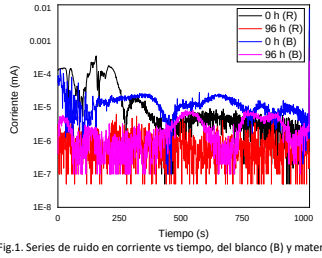


Fig.1. Series de ruido en corriente vs tiempo, del blanco (B) y material con recubrimiento (R), ambos evaluados en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl a lo largo del tiempo.

Índice de localización

A partir de la Fig.2. del Índice de localización contra el tiempo del blanco y material con el uso de recubrimiento evaluados en la solución que simula corrosión atmosférica marina-industrial. Para el caso del blanco se observa la presencia de corrosión localizada y como el valor de LI decrementa conforme pasa el tiempo. Para el caso del material con el uso de recubrimiento se obtiene que el valor de LI incrementa conforme pasa el tiempo, para disminuir a las 48 h y posteriormente volver a incrementarse, este efecto puede ser asociado al picado de la capa de productos de corrosión la cual tiende a autosellarse conforme pasa el tiempo. Cabe mencionar que el índice de localización es inversamente proporcional a la densidad de corriente, por lo tanto cuando incrementa el valor de LI, la velocidad de corrosión disminuye y viceversa.

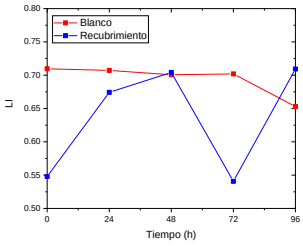


Fig.2. Índice de localización del blanco y material con el uso de recubrimiento evaluados a lo largo del tiempo, en una solución que simula corrosión atmosférica marina-industrial.

Tabla 1. Clasificación de tipo de corrosión de acuerdo con el índice de localización.

Valores	Tipo de corrosión
>0.1	Iniciación de picado
0.1 y 1	Corrosión localizada
0.01 y 0.1	Corrosión mixta
0.001 y 0.01	Corrosión Generalizada o Estado de Pasivación

Tabla 2. Índices de localización obtenidos del material base evaluado en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl a lo largo del tiempo.

Material base evaluado a lo largo del tiempo (h)	Valores del índice de localización (L.I.)	Tipo de corrosión
0	0.70	Corrosión localizada
96	0.65	

Tabla 3. Índices de localización obtenidos del material con el uso de recubrimiento evaluado en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl a lo largo del tiempo.

Material con recubrimiento evaluado a lo largo del tiempo (h)	Valores del índice de localización (L.I.)	Tipo de corrosión
0	0.54	Corrosión localizada
96	0.70	

Conclusiones

- A partir de la serie de ruido en corriente, se observa que al agregar el recubrimiento reduce la densidad de corriente.
- Mediante el grafico de resistencia al ruido, se observa el incremento de Rn al aplicar el recubrimiento.
- Con base en los resultados del Índice de localización, se observa una disminución de los sitios localizados cuando se aplica el recubrimiento.
- Dados los resultados anteriores, el recubrimiento es viable para su aplicación para mitigar la corrosión.

Referencias

[1] Negm, NA; Ghuiba, FM; Tawfik S.M. (2011). Novel isoxazolium cationic Schiff base compounds as corrosion inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid. Corrosion Science 2011, 53, 3566 – 3575, DOI: 10.1016/j.corsci.2011.06.029
[2] Jáquez Muñoz J. M., Gaona Tiburcio C. Cabral Miramontes J., Nieves Mendoza D., Maldonado Bandala E., Olguín Coca J., López León L. D., Flores de los Ríos J. P., Almeraya Calderón F. (2021). Electrochemical Noise Analysis of the Corrosion of Titanium Alloys in NaCl and H2SO4 solutions. Metals, 11, 105. MDPI. https://doi.org/10.3390/met11010105
[3] Lv J., Yue Q., Ding R., Wang X., Gui T., Zhao X. (2021). The Application of electrochemical noise for the study of metal corrosion and organic anticorrosion coatings a review. Chemistry Europe. Vol.8, Pages 337-351. doi.org/10.1002/celc.202001342
[4] Arellano Pérez, J. H., Escobar-Jiménez, R.F., Ramos-Negrón, O.J., Lucio-García, M.A., Gómez-Aguilar, J.F., Uruchurtu-Chavarín, J. (2022). El uso de una transformada de tiempo-frecuencia para el análisis del ruido electroquímico para la estimación de la corrosión, *Problemas matemáticos en ingeniería*, 4333607, 11 páginas. https://doi.org/10.1155/2022/4333607

Memorias del 5to Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (5to CITCA 2025)
26 - 28 de Noviembre 2025, Cuernavaca, Morelos

¿Podemos anticipar el Futuro del Océano con Inteligencia Artificial?

Emmanuel Romero[1,2], Romeo Saldívar-Lucio[1,2]
[1]SECIHTI, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, 03940, Mexico
[2]Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Unidad La Paz. La Paz, B.C.S. 23096, Mexico

Introducción

El cambio climático ha provocado que los océanos se calienten a un ritmo sin precedentes [1]. La **Temperatura Superficial del Mar (TSM)** es como un termómetro global: tiene efectos directos en la distribución y abundancia de especies pesqueras, en la biodiversidad y en la formación de eventos extremos, tales como ondas de calor o huracanes [2-4].

Comprender y predecir estos cambios es clave para proteger tanto a las comunidades costeras como a los ecosistemas marinos

¿Sabías que ...

... los océanos han absorbido más del 90% del calor adicional generado por el cambio climático [5]?

... la pesca de muchas especies depende directamente de la temperatura del mar y otros factores ambientales [6]?

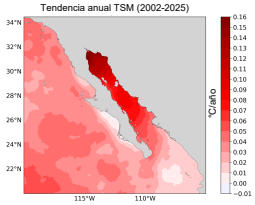


Fig. Aumento anual de la TSM desde 2002 en el Noroeste de México.

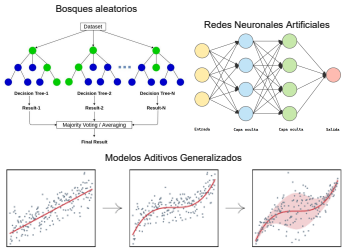
¿Cómo se hacía?

Durante muchos años, los pronósticos de la TSM se han realizado por medio de **modelos climáticos complejos** que necesitan supercomputadoras.

No siempre logran predicciones correctas, y en varios casos se ha demostrado que los modelos estadísticos pueden predecir mejor los cambios en la TSM [e.g., 7-9].

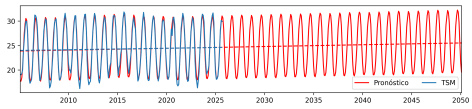
¿Qué propone el campo de la Inteligencia Artificial (IA)?

1. Seleccionar múltiples modelos estadísticos y de aprendizaje automático.



2. Entrenar a los modelos con registros históricos de la TSM y datos atmosféricos, ajustando distintas combinaciones de hiperparámetros.

3. Combinar los mejores modelos con aprendizaje por conjuntos para realizar las predicciones.



¿Por qué este enfoque puede lograr mejores predicciones?

Los **modelos estadísticos** tradicionales aprovechan principios matemáticos para describir relaciones entre variables.

Los **modelos de aprendizaje automático** son modelos estadísticos que aprenden de los datos, encuentran relaciones complejas y patrones que serían difíciles de identificar con otros métodos.

El **aprendizaje por conjuntos** combina varios modelos para aprovechar lo mejor de cada uno y lograr predicciones más precisas [10].

Aplicaciones e impacto en México

Con el apoyo de la IA, las predicciones de la TSM podrían mejorar nuestra capacidad de:

Anticipar fenómenos climáticos extremos

Gestión de riesgos:
Ante tormentas tropicales huracanes, ondas de calor, etc.

Fortalecer la resiliencia costera

Impacto social:
Preparar a las comunidades ante desastres marinos

Apoyar a la gestión ambiental y la conservación

Impacto ecológico:
Proteger arrecifes, manglares y a la biodiversidad en general

Favorecer la pesca sustentable

Impacto económico:
Asegurar alimento y empleo sin agotar los recursos

Conclusión

La estrecha relación de la temperatura del mar con la dinámica de los ecosistemas marinos, representa información clave para la toma de decisiones en ámbitos como la pesca sustentable, la gestión ambiental y la resiliencia costera. Aunque la IA no reemplazará los fundamentos físicos de los modelos climáticos, si puede mejorar los pronósticos de temperatura, combinando estrategias de aprendizaje automático y de conjuntos, y con ello contribuir a enfrentar la variabilidad climática y el calentamiento global, con mayor precisión y menor costo computacional.

Para saber más

Pure Sense 360 Sistema de monitoreo en la calidad del aire

Flores Villegas Ángel Gabriel, Díaz Gómez Jesús, Cortés-Martínez Keila Vasthi
*Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, Puebla, México.

Introducción

Este proyecto utiliza un enfoque cuantitativo y experimental para desarrollar y validar un sistema basado en Arduino que monitorea la calidad del aire y la humedad en zonas urbanas contaminadas. La metodología de prototipado incluye: identificar necesidades, seleccionar sensores (DHT11, MQ-135), diseñar circuitos de forma iterativa, programar en Arduino IDE, crear una interfaz intuitiva, calibrar el sistema, realizar pruebas en entornos reales, evaluar datos y refinar el prototipo. El objetivo fue construir un dispositivo accesible que recolecte datos ambientales en tiempo real, mostrando resultados claros para usuarios sin experiencia técnica, contribuyendo a la mejora de la calidad ambiental en espacios interiores y exteriores.

Contenido Principal

La calidad del aire y la humedad son factores cruciales para la salud, especialmente en entornos sensibles como hospitales y hogares. En el ámbito hospitalario, un ambiente controlado favorece la recuperación de los pacientes, mientras que en casa, una mala calidad del aire puede agravar afecciones respiratorias como el asma y las alergias. Sin embargo, no existen herramientas accesibles y fáciles de usar para que el público en general pueda monitorear estos parámetros. Para abordar esta necesidad, proponemos el desarrollo de PureSense 360, un dispositivo intuitivo que mide la calidad del aire y la humedad en tiempo real. Los datos pueden ser visualizados directamente en una pantalla integrada o enviados a un servidor para su consulta remota a través de un teléfono o computadora, democratizando así el acceso a información ambiental valiosa.

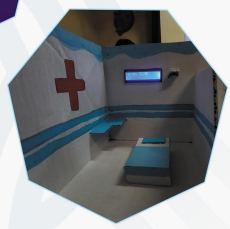
¿Sabías que...?

*Con Arduino se pueden crear sistemas de monitoreo ambiental accesibles incluso para personas sin experiencia técnica.
Sensores como el DHT11 y el MQ-135 permiten medir humedad y calidad del aire en tiempo real.
*Gracias a la metodología de prototipado iterativo, es posible refinar un dispositivo paso a paso: desde la identificación de necesidades hasta las pruebas en entornos reales.
*Este tipo de proyectos no solo mejoran la calidad del aire en interiores y exteriores, sino que también generan datos útiles para la toma de decisiones ambientales.

Imágenes y gráficas

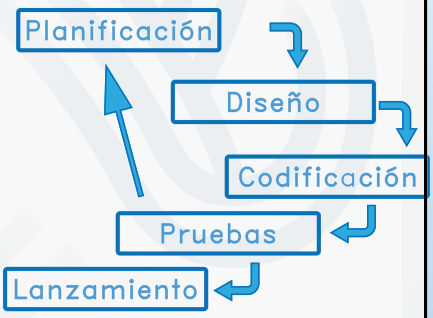
OBJETIVO: Diseñar y desarrollar un sistema inteligente que permita monitorear y controlar en tiempo real la temperatura y humedad de entornos cerrados, mediante sensores conectados a Arduino y una plataforma web que facilite la gestión remota del ambiente

Prototipo

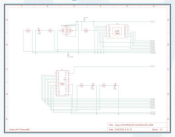


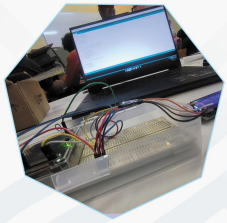
PureSense 360
ITSAO

Metodología XP

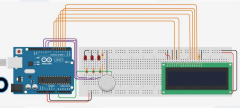


Diagrama





Circuito Electrónico



Aplicaciones o Impacto en la vida cotidiana/entorno

*Hogares y oficinas: Permite a las personas monitorear la calidad del aire y la humedad en espacios cerrados, ayudando a prevenir problemas respiratorios y mejorar el confort.
*Escuelas y centros de trabajo: Proporciona datos en tiempo real que apoyan la creación de ambientes saludables para el aprendizaje y la productividad.
*Entornos urbanos: Contribuye a identificar zonas con altos niveles de contaminación, promoviendo la toma de decisiones para reducir riesgos ambientales.
*Conciencia ambiental: Facilita que cualquier persona, incluso sin conocimientos técnicos, pueda entender la calidad del aire que respira y tomar medidas preventivas.
*Prevención de enfermedades: Ayuda a personas sensibles (niños, adultos mayores o quienes padecen asma y alergias) a evitar la exposición a condiciones
dañinas.
*Apoyo a investigaciones: Sirve como herramienta de bajo costo para estudiantes y científicos en estudios relacionados con el cambio climático y la contaminación.

Conclusion o mensaje final

El prototipo de PureSense 360 demostró ser un sistema preciso, accesible y adaptable para monitorear la calidad del aire y la humedad. Su diseño modular y bajo costo lo posicionan como una herramienta útil para mejorar la salud y el confort en entornos hospitalarios y domésticos.
A pesar de la limitación de una sensibilidad reducida en condiciones de alta humedad, el sistema es altamente escalable. Las futuras mejoras se enfocarán en:
- Integrar sensores más robustos.
- Desarrollar una aplicación móvil dedicada.
- Optimizar el análisis de datos para ofrecer recomendaciones personalizadas a los usuarios.

Para Saber más

*Espinoza, N. M. O., & Sosa, V. M. P. (2024). Monitoreo de la calidad del aire con dispositivo Arduino: Análisis de datos de PM2.5 en la Ciudad de Pilar. Revista Veritas de Difusão Científica, 5(1), 72–86.
*Mendoza, N. B. (2023). Estudio de la viabilidad de implementación de una estación de monitoreo de la calidad del aire utilizando la tecnología Arduino [Tesis de doctorado, Universidad Libre].
*Guillen Gomez, I. (2021). Modelo de implementación para el monitoreo y control de condiciones ambientales basados con tecnologías de Arduino y Raspberry.

Memorias del 5to Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (5to CITCA 2025)
26 - 28 de Noviembre 2025, Cuernavaca, Morelos

ESTUDIO PRELIMINAR PARA MANTENER LA VITALIDAD DE LAS PLANTAS HORTÍCOLAS BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE SUSTRATO Y MICROAMBIENTE

MC. Lizbeth Vidal Cortez ∗ Dr. Juan Reyes Reyes ∗ Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
∗ Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62490 CUERNAVACA, Mor.
e-mail: d23ce039@cenidet.tecnm.mx

Resumen

La horticultura es una rama de la agricultura que se encarga del cultivo, manejo y aprovechamiento de plantas hortícolas, principalmente hortalizas, frutas, flores y plantas ornamentales. Teniendo como objetivo principal el producir alimentos y productos vegetales de alta calidad, aprovechando eficientemente los recursos del suelo, el agua y el ambiente. Esta disciplina integra conocimientos de fisiología vegetal, nutrición, microbiología del suelo, ingeniería agrícola y manejo ambiental, buscando mantener la salud del cultivo y la sostenibilidad del sistema productivo. Además, promueve prácticas que conservan la biodiversidad y reduciendo el impacto ambiental, como el uso de bioinsumos, compostas y técnicas de riego, [1].

Introducción

La vitalidad de las plantas hortícolas depende de múltiples factores, entre los que destacan las características físicas, químicas y biológicas del sustrato, así como las condiciones del microambiente (temperatura, humedad, luz). Por ello, es necesario identificar y aplicar las recomendaciones que permitan mantener la vitalidad de las plantas hortícolas bajo diferentes condiciones de sustrato y microambiente, [3], [4].

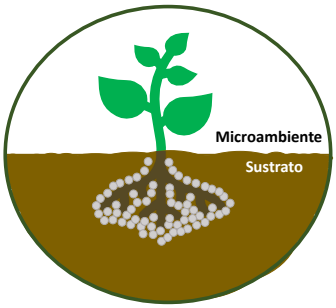


Fig.1 Representación de las interacciones de una planta con el microambiente y su sustrato.

Planteamiento del problema

La vitalidad de las plantas hortícolas depende de múltiples factores, entre los que destacan las características físicas, químicas y biológicas del sustrato, así como las condiciones del microambiente (temperatura, humedad, luz). Por ello, es necesario identificar y aplicar las recomendaciones que permitan mantener la vitalidad de las plantas hortícolas bajo diferentes condiciones de sustrato y microambiente. La elección y mezcla de sustratos (como perlita, turba, fibra de coco, vermiculita, entre otros) influyen directamente en la retención de agua, aireación, disponibilidad de nutrientes y desarrollo radicular, factores esenciales para la vitalidad de las plantas. Los microorganismos eficientes pueden mejorar la germinación, el crecimiento, la resistencia a enfermedades y la absorción de nutrientes, reduciendo la dependencia de insumos químicos y promoviendo una agricultura más sostenible, [2].

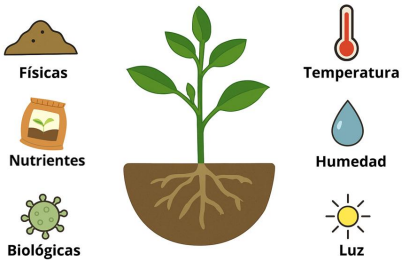


Fig.2 Características del sustrato y del microclima.

Condiciones

Las condiciones que presentas para el sustrato y del microambiente corresponden a pruebas comparativas que se especifican los siguientes autores (Cacini et al., 2021), (Vatistas et al., 2022), (Martins et al., 2023) y (Mao et al., 2024)

Condiciones del sustrato		
Textura y estructura	Mezcla aireada y porosa (fibra de coco + perlita + compost 40:40:20)	Favorece la oxigenación radicular
Retención de agua	Moderada, sin encharcar	Previene estrés hídrico y pudrición
pH	5.5 – 6.5	Facilita absorción de nutrientes
Materia orgánica	20–30%	Mejora fertilidad y microbiota
Microorganismos benéficos	Aplicar bioinsumos	Aumenta resistencia y vigor

Condiciones del microambiente		
Temperatura	20–28 °C	Favorece metabolismo y fotosíntesis
Humedad relativa	60–80%	Reduce estrés y mejora transpiración
Luz	6–8 h de luz	Estimula crecimiento vegetativo
Ventilación	Flujo constante, evitar excesos	Evita hongos y regula temperatura
Riego	Según fase de cultivo y tipo de sustrato	Mantiene balance hídrico estable

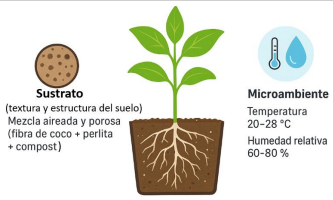


Fig.3 Condiciones del sustrato y del microambiente.

Resultados

La implementación de condiciones adecuadas en el manejo de sustratos y microambientes en cultivos hortícolas genera efectos positivos con el uso de sustratos de buena porosidad y retención de agua, como mezclas con cascarilla de arroz o vermicomposta, puede lograr tasas de supervivencia superiores al 80% en especies y mejorar el enraizamiento en ornamentales y hortalizas, (Tikoria et al., 2022).

Conclusiones

Los resultados obtenidos respaldan la conclusión de que la selección adecuada de sustratos con propiedades físicas y químicas favorables, junto con el uso de bioestimulantes y microorganismos eficientes, constituye una estrategia fundamental para potenciar el crecimiento, la biomasa, el enraizamiento y el rendimiento de las plantas. Las condiciones permiten adaptar la producción hortícola a diferentes contextos y desafíos ambientales, promoviendo sistemas agrícolas más resilientes y sostenibles.

[1].-López-Corona, B. E., Mondaca-Fernández, I., Gortáres-Moroyoqui, P., Meza-Montenegro, M. M., Balderas-Cortés, J. D. J., Ruíz Alvarado, C., & Rueda-Puente, E. O. (2020). Ecofisiología y bioquímica de Salicornia bigelovii (Torr.) por efecto de quitosano-aib bajo condiciones del desierto de Sonora. *Polibotánica*, (49), 75-92.
[2].-Alarcon, J., Recharte, D., Yanqui, F., Moreno, S. M., & Buendía, M. A. (2020). *Fertilizar con microorganismos eficientes autóctonos tiene efecto positivo en la fenología, biomasa y producción de tomate (Lycopersicum esculentum Mill). Scientia Agropecuaria 11 (1): 67-73.*
[3].-Monsalve Camacho, O. I., Henao Toro, M. C., & Gutiérrez Díaz, J. S. (2021). Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo.
[4].-Barbaro, L. A., & Karlanián, M. A. (2020). Efecto de las propiedades físicas del sustrato sobre el desarrollo de plantines florales en maceta. *Ciencia del suelo*, *38*(1), 01-11.

Instrumentación y Puesta en Marcha de un Reactor Continuo

Daniel Moreno Galíndez, Sandro Vazquez Maceda, Manuel Adam Medina, Abisai Acevedo Quiroz, Marisol Cervantes Bobadilla
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Introducción

En los últimos años, el interés por los biocombustibles ha crecido como respuesta a la necesidad de reducir el impacto ambiental y la dependencia de combustibles fósiles. Entre ellos, el biodiésel destaca por su carácter renovable y su compatibilidad con los motores diésel convencionales [1]. Para mejorar la producción continua y asegurar una producción de calidad, resulta esencial comprender la dinámica del proceso y contar con una instrumentación adecuada. En este contexto, el rediseño e instrumentación de un reactor continuo tiene como objetivo mejorar la operatividad del proceso de producción de biodiesel. Esta mejora busca minimizar las pérdidas térmicas y permitir un control más preciso de las variables críticas que afectan la conversión de aceites vegetales en biodiesel [2].

Reconstrucción del Reactor Tubular Continuo

En la figura 1, se presenta el esquema de construcción del reactor, el cual incluye agitadores estáticos expuestos a temperatura ambiente. También incorpora tubos de precalentamiento removibles para facilitar su mantenimiento y el sistema funciona mediante operación manual, lo cual representa una oportunidad de mejora mediante la incorporación de instrumentación. Con el objetivo de mejorar el proceso, se propone reducir las pérdidas térmicas mediante el aislamiento de los componentes expuestos, así como adecuar el sistema de tuberías para permitir la instalación de sensores necesarios para una instrumentación precisa y eficiente. La Figura 2 muestra el rediseño del reactor, incluyendo la disposición de los sensores integrados. Además, se detallan las principales características del sistema y los instrumentos empleados en el proceso de producción de biodiesel, el cual, cuenta principalmente con 2 bombas (características y/o tipos, marca), tipos de sensores de temperatura y de flujo (marca de ambos sensores), características de la tubería, longitud, y describir el reactor con su agitador.

Proceso de producción

Preparación de reactivos:
- Se mezclan aceite vegetal (triglicéridos) y alcohol con catalizador, manteniendo una relación molar controlada.

Alimentación y medición:
- Bombas dosificadoras impulsan los reactivos, mientras caudalímetros registran los flujos de alimentación en tiempo real.

Mezcla y reacción inicial:
- Los reactivos se homogenizan en un mezclador estático e ingresan al reactor principal, mantenido a 60 °C, donde inicia la reacción de transesterificación.

Reactor tubular continuo:
- La mezcla parcialmente reaccionada pasa a un reactor tubular helicoidal, donde se completa la conversión a biodiésel y glicerina.

Separación de fases:
- Los productos se envían a una etapa de decantación de 24 h para separar naturalmente el biodiésel del glicerol.

Monitoreo del proceso:
- Sensores de flujo y temperatura ubicados a lo largo del sistema permiten controlar y registrar las condiciones operativas del reactor.

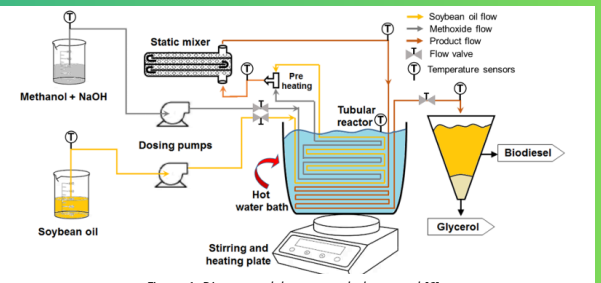


Figura 1. Diagrama del reactor tubular actual [6]

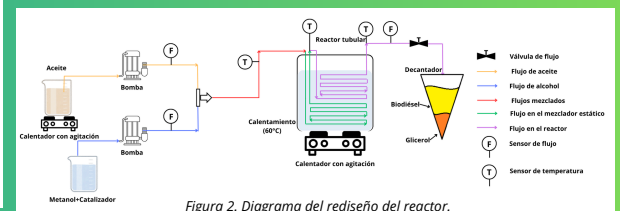


Figura 2. Diagrama del rediseño del reactor.

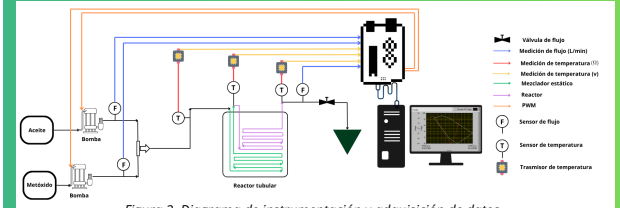


Figura 3. Diagrama de instrumentación y adquisición de datos.

Impacto en la vida cotidiana

La instrumentación de un reactor continuo para la producción de biodiésel busca mejorar un proceso clave en la generación de energías limpias. Al mejorar la eficiencia de reacción aumentando la cantidad de aceite vegetal transformado en biodiésel mientras se reduce el consumo de insumos y los costos de operación industrial[5]. En la vida cotidiana, su impacto se refleja en la disminución de gases contaminantes como CO_2, CO y SO_2, mejorando la calidad del aire y mitigando el cambio climático[1]. Además, el uso de biodiésel contribuye a una transición energética más sostenible, impulsando el desarrollo tecnológico nacional y fomentando prácticas ambientales responsables en los sectores de transporte, energía y agricultura.[4]

Conclusión

El rediseño e instrumentación del reactor tubular helicoidal continuo permitirá mejorar la operatividad del equipo, garantizando una producción más estable y eficiente de biodiésel. La integración de sensores de temperatura y flujo proporciona datos en tiempo real que facilitan el monitoreo y control de las condiciones de operación, sentando las bases para la implementación de estrategias de control automático. Este desarrollo contribuye a fortalecer la producción de biocombustibles como alternativa sustentable a los derivados del petróleo, impulsando la transición hacia fuentes de energía más limpias y el aprovechamiento responsable de recursos renovables.

Referencias bibliográficas

[1] Carter, D., & Halle, J. (2005). How to Make Biodiesel. Low-Impact Living Initiative (Lili).
[2] Yang, Y., & Harper, J. (2024). Adaptive state feedback controller design for efficient biodiesel production under kinetic uncertainty. Chemical Engineering Research and Design, 209, 81–93.
[3] Freedman, B., Pryde, E.H. y Mounts, T.L. (1984) 'Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils', Journal Of The American Oil Chemists Society, 61(10), pp. 1638-1643. https://doi.org/10.1007/bf02541649.
[4] Prasad, S., & Ingle, A. P. (2019). Impacts of sustainable biofuels production from biomass. En Elsevier eBooks (pp. 327-346). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817654-2.00012-5
[5] Ali, M. M., Gheni, S. A., Ahmed, S. M., Hmood, H. M., Hassan, A. A., Mohammed, H. R., ... & Karakullukcu, N. T. (2023). Catalytic production of biodiesel from waste cooking oil in a two-phase oscillatory baffled reactor: Deactivation kinetics and ANN modeling study. Energy Conversion and Management: X, 19, 100383.
[6] Acevedo-Quiroz, A. et al. (2024) 'Experimental Study on Biodiesel Production in a Continuous Tubular Reactor with a Static Mixer', Processes, 12(12), p. 2859. https://doi.org/10.3390/pr12122859.

Producción de biopolimeros a base de desechos vegetales.

SAUL ARTURO MORALES PALMA*; DIEGO SALAZAR ALVAREZ*
* FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS - UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

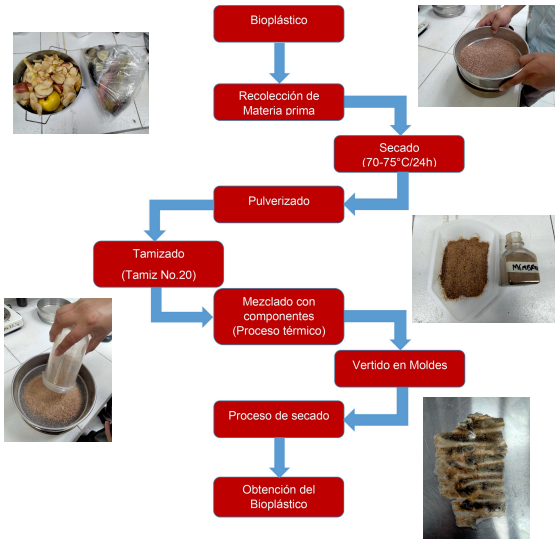
Introducción

En la agroindustria se generan grandes volúmenes de residuos vegetales que no se aprovechan y contaminan el ambiente. Este proyecto tuvo como objetivo principal elaborar un biopolímero biodegradable a partir de desechos vegetales para sustituir plásticos convencionales en envases y utensilios.
El desarrollo de biopolímeros permite reducir la contaminación plástica, aprovechar residuos orgánicos y fomentar una economía circular (Gurusharan & Hernández, 2023).

Datos a considerar y de importancia

Tipo de Plástico	Degradabilidad en condiciones ambientales	Aporte nutrimental al suelo	Tipo de elaboración	Nivel de industrialización	Costos de producción
Bioplástico (Biopast)	80 días – 160 días	Alto (carbono para microbiota, minerales [K, Ca, Mg, P, N], ajuste de pH)	Químico - físico	Posibles usos (Embaces, utensilios desechables, charolas de germinación)	USD $7.74 - $10.68/ kg
PLA	80–100 años	Bajo/Nulo (no contiene nutrientes significativos para el suelo)	Fermentación de azucares vegetales (maiz, caña de azúcar, remolacha)	Muy usado en envases, impresión 3D, empaques	USD $2.00-$3.50 / kg
PHA	1-2 años	Medio/Alto (se biodegrada en compuestos beneficiosos como CO2 y H2O y biomasa)	Fermentación bacteriana de aceites o azucares vegetales	En expansión, aun limitado por costos de producción	USD $4.00-$15.00 / kg
PET/PETE	Más de 450 años	No se biodegrada ni aporta nutrientes	Polimerización de derivados del petróleo (etilenglicol + ácido Tereftálico)	Ampliamente utilizado en botellas, textiles, envases.	USD $1.10-$1.30 / kg

Proceso de elaboración y productos finales



Metodología

El proceso de elaboración comienza mediante la recolección de la materia prima, generalmente tirada en contenedores de basura después de su uso en platillos, jugos, entre otras cosas posteriormente se pone a secar en una estufa, deshidratadora u horno, por 24 horas aproximadamente a 70-75°C, después se pulveriza y tamiza con un tamiz del número 20, posteriormente se mezcla con otros componentes como mucilago de nopal, glicerina, ácido acético y otros elementos mediante un proceso térmico, se procede a verter en moldes, y se lleva a un proceso de secado, obteniendo como producto un bioplástico.

Resultados

El material obtenido mostró una textura firme y homogénea, con capacidad de moldeado para fabricar objetos biodegradables.
Durante pruebas ambientales, el biopolímero presentó degradación parcial en pocas semanas, confirmando su biodegradabilidad.

Según Gurusharan y Hernández (2023), los biopolímeros a base de plantas representan una alternativa viable a los plásticos de origen fósil..

Impacto e importancia

El consumo de plástico en México sigue siendo elevado, y gran parte no se recicla, provocando contaminación en suelos y cuerpos de agua.
El biopolímero propuesto ofrece una alternativa ecológica y económica, al transformar residuos agrícolas en materiales útiles.
Su aplicación impulsa la producción sostenible, mejora la fertilidad del suelo y fomenta una cultura ambiental responsable (Lara & García, 2023).

Conclusión

Los biopolímeros elaborados a partir de residuos vegetales representan una solución sustentable para disminuir la contaminación plástica.
Su implementación contribuye a un modelo de producción responsable, promueve el aprovechamiento de recursos orgánicos y mejora la fertilidad del suelo.

Referencias

- Gurusharan, M. K., & Hernández, M. R. (2023). Impacto de la glicerina en los bioplásticos a base de almidón.
- Jiménez, A., & García, P. (2024). Revalorización de residuos agrícolas en la síntesis de biopolímeros.
- Lara, S., & Rivera, M. (2023). Aplicaciones sustentables de bioplásticos en la agricultura mexicana.
- Cruz, A. L. (2022). Degradación, compostaje y biodurabilidad de bioplásticos.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de la Dra. Maria Dolores Mariezcurrena Berasaín, Lic. en E. Berenice Muciño Cuadros, Dr. Rodolfo Serrato Cuevas, Dr. Omar Franco Mora y al estudiante integrante de nuestro nuestro equipo de trabajo Oscar Michel Malvaez Bustamante.

Producción de biopolimeros a base de pasto común.

DIEGO SALAZAR ALVAREZ*; SAUL ARTURO MORALES PALMA*
* FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS - UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

Introducción

El manejo de áreas verdes genera grandes volúmenes de pasto cortado que, en la mayoría de los casos, se desechan sin un aprovechamiento productivo. Esta biomasa residual, rica en celulosa y hemicelulosa, representa una fuente renovable que puede transformarse en bioplásticos, ofreciendo así una alternativa sostenible para reducir residuos y dependencia de plásticos derivados del petróleo (Costa *et al.*, 2023).

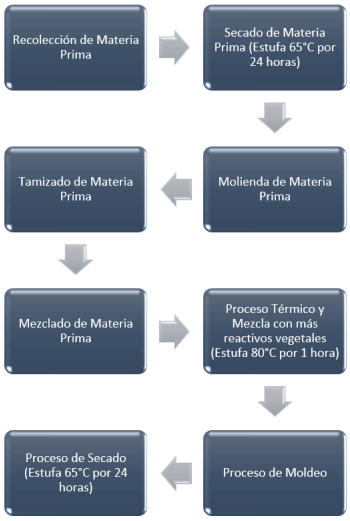
Datos a considerar y de importancia

En México se generan 5.7 millones de toneladas de residuos plásticos mal gestionados al año, lo que contribuye significativamente a la contaminación y a las emisiones de gases de efecto invernadero (La Jornada Maya, 2023).

Sólo alrededor del 30 % de los plásticos consumidos en México son reciclados, equivalente a 1.9 millones de toneladas de un total de 6.5 millones anuales (La Jornada, 2021).

Proceso de elaboración y productos finales

Diagrama de flujo de la elaboración



Contenido principal

El problema del consumo de plástico en México es cada vez más evidente cada año se generan millones de toneladas de residuos mal gestionados y el reciclaje apenas no cubre el consumo nacional. Frente a este panorama, surge la necesidad de alternativas sostenibles que reduzcan tanto la contaminación como la dependencia del petróleo.

El pasto común, abundante en áreas verdes y generalmente desechado tras el corte, representa una oportunidad valiosa. Su composición, rica en celulosa y hemicelulosa, permite transformarlo en bioplásticos mediante procesos relativamente simples. El procedimiento inicia con la recolección y secado del pasto, seguido de un pretratamiento que rompe las fibras vegetales para liberar compuestos útiles. Posteriormente, estos compuestos pueden convertirse en biopolímeros a través un proceso de mezcla con algunos otros productos orgánicos y un proceso térmico para generarse en películas y láminas de celulosa.

Para mejorar la resistencia y durabilidad del material, se emplean plastificantes y aditivos naturales, logrando un bioplástico que puede usarse en muchos productos de un solo uso. De esta forma, no solo se aprovecha un residuo vegetal abundante, sino que también se ofrece una alternativa más amigable con el ambiente y con potencial de integrarse en economías locales.

Impacto en la vida cotidiana

El aprovechamiento del pasto común como materia prima puede reducir la dependencia del petróleo para la creación de plásticos sintéticos y valorizar residuos agrícolas, impulsando economías rurales y microempresas dedicadas a la producción de productos a partir de residuos. Sin embargo, requiere sistemas adecuados de manejo y regulación de aditivos para garantizar beneficios ambientales y de salud (Estrada-Sotomayor *et al*, 2025). Los biopolímeros realizadas con residuos orgánicos amplían el panorama de aplicación, buscando que sea aplicable en casi todos los sectores donde hay un exceso de consumo en plásticos no degradables.

Conclusión o mensaje final

La elaboración de peliculas plasticas a partir del aprovechamiento de residuos, promueve y fomenta el aprovechamiento de los residuos para la disminución del uso de plasticos que tardan en degradarse una cantidad considerada de tiempo y su principal problema es la contaminación del suelo, mientras que los bioplasticos se degradan y contribuyen con componentes que se pueden considerar amigables con el suelo al servir como nutrientes por sus componentes de origen vegetal que se pueden aprovechar por las plantas.

Referencias

- Costa, A., Encarnação, T., Tavares, R., Todo Bom, T., Mateus, A., & otros. (2023). Bioplastics: Innovation for green transition. Polymers, 15(3), 517. https://doi.org/10.3390/polym15030517
- Estrada-Sotomayor, J. D., Łopusiewicz, Ł., Lizundia, E., Guenther, S., & Merino, D. (2025). Full conversion of grass biomass into sustainable functional antimicrobial bioplastics. Green Chemistry, 27, 4587–4602. https://doi.org/10.1039/D5GC00643K
- La Jornada. (2021, 19 de mayo). México recicla 30% del plástico que consume: Anipac. La Jornada. https://www.jornada.com.mx/notas/2021/05/19/economia/mexico-recicla-30-del-plastico-que-consume-anipac/
- La Jornada Maya. (2023, 19 de junio). Mala gestión en México de 5.7 millones de toneladas de residuos plásticos por año. La Jornada Maya. https://www.lajornadamaya.mx/nacional/228778/mala-gestion-en-mexico-de-5-7-millones-de-toneladas-de-residuos-plasticos-por-ano

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de la Dra. Maria Dolores Mariezcurrena Berasaín, Lic. en E. Berenice Muciño Cuadros, Dr. Rodolfo Serrato Cuevas, Dr. Omar Franco Mora y al estudiante integrante de nuestro equipo de trabajo Oscar Michel Malvaez Bustamante.

VALORIZACIÓN DE OLOTE DE MAÍZ PARA LA ELABORACIÓN DE BIOPOLÍMEROS.

Guadalupe Rodríguez Martínez*, David Reyes González *, Itzel Galaviz Villa**, Yodaira Borroto Pentón*,Nadia Estrella Juan López*, Miguel Ángel López Ramírez***

*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla.
**Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Boca del Río.
***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre.

Introducción

El olote de maíz, tradicionalmente considerado un residuo agrícola, representa una fuente abundante y poco aprovechada de biomasa lignocelulósica. En la actualidad se buscan alternativas sostenibles en la producción de plásticos convencionales, siendo cada vez más relevantes, la valorización de subproductos agroindustriales. El aprovechamiento del olote de maíz para la obtención de biopolímeros no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también promueve el desarrollo de materiales biodegradables que pueden sustituir a los plásticos derivados del petróleo. Esta estrategia impulsa la economía circular, la cual tiene como propósito crear un sistema de circuito cerrado donde se minimizan los residuos.

Contenido principal

El olote de maíz es un subproducto agrícola que se genera en grandes cantidades en el proceso de separación del gano de la mazorca, se estima que por cada tonelada de maíz se obtiene 170 kg de olote; dicho residuo esta constituido por 45% de celulosa, 15.8 % de lignina, 33.6 % de hemicelulosa y el resto de otros componentes (Córdoba *et al*., 2013). La celulosa es un polímero natural que se usa como materia prima en la producción de biopolímeros; los biopolímeros se caracterizan por su capacidad de degradarse en un periodo menor a un año, con generación de CO_2, agua y biomasa como producto final (Barrera, 2015).

Imágenes y gráficas

Figura 1 . Proceso de producción de biopolímero a base de celulosa de olote de maíz de acuerdo a Macías-Rodríguez *et al*., 2021.
Fuente: Propia

¿Sabías que los plásticos pueden tardar entre 150 y 1000 años en degradarse completamente?

El mal manejo de los residuos plásticos provoca su acumulación en diversos ecosistemas, incrementando cada año la cantidad de desechos, dañando la flora y fauna y generando un riesgo a la salud humana.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Los biopolímeros elaborados a partir de residuos agroindustriales son una alternativa sostenible a los plásticos convencionales. Su producción aprovecha residuos como lo es el olote de maíz, que al no tener una disposición adecuada generan problemas de contaminación. Diversos estudios han demostrado que los biopolímeros pueden ser utilizados como empaques, recubrimientos, bolsas, utensilios, entre otras aplicaciones.

Conclusión o mensaje final

El olote de maíz, tradicionalmente visto como un residuo agroindustrial, el cual se posiciona hoy como una valiosa fuente de obtención de celulosa para la formulación de biopolímeros. Su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de biopolímeros contribuye significativamente a la reducción de residuos, de emisiones de gases de efecto invernadero, impulsando así la economía circular y la sostenibilidad.

Referencias "Para saber más"

- Barrera, G. (2015). Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA, Santa Tecla. Obtenido de http://hdl.handle.net/10972/2436.
- Córdoba, J. A., Salcedo, E., Rodríguez, R., Zamora, J. F., Manríquez, R., Contreras, H., ... & Delgado, E. (2013). Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas. *Revista latinoamericana de química*, *41*(3), 171-184.
- Macías-Rodríguez, N. A., Armenta-Valenzuela, B., Peláez-Estrada, U. V., Norzagaray-Cervantes, G. A., & Camargo-Luque, A. (2021). Obtención de celulosa a partir de rastrojo y olote de Maíz, *Zea mays L. Rev. IYDT*, *13*(4), 1087-1095.

Bioproducción de Pigmentos Fúngicos de Talaromyces: Una Estrategia Sostenible Utilizando Residuos Agroindustriales

Lucely Berumen Rangel *, Julio César Montañez **, Miguel Ángel Villegas Méndez**, Nagamani Balagurusamy*, María José Castro Alonso*, Lourdes Morales Oyervides**

* Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México.

**Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.

Introducción

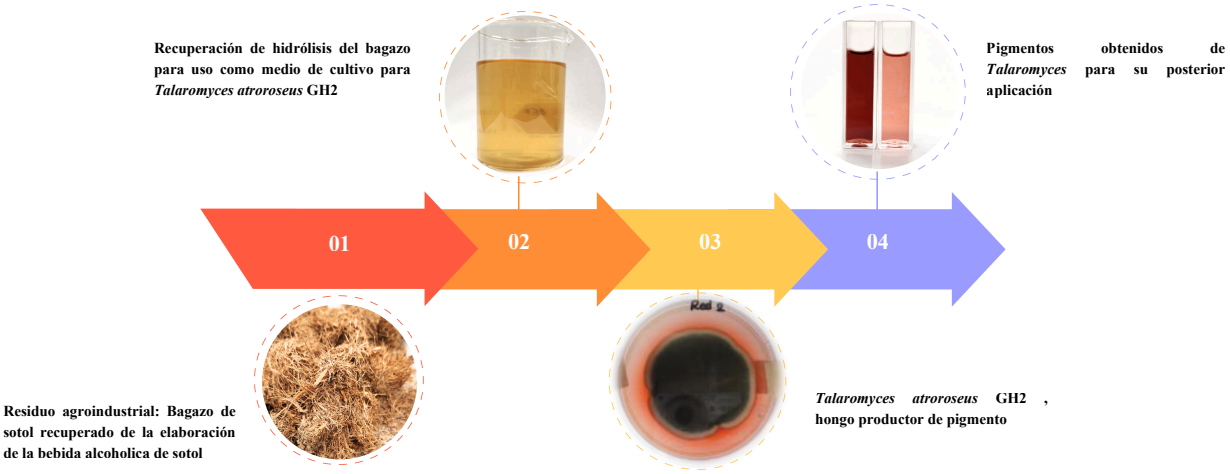
La reciente prohibición del Rojo No. 3 por la FDA en Estados Unidos ha creado una necesidad urgente en la industria global de alimentos de encontrar reemplazos seguros. Este escenario abre una ventana de oportunidad para que México incentive la investigación y desarrollo de pigmentos naturales a partir de fuentes microbianas.

Los cuales no solo ofrecen una opción segura para reemplazar colorantes sintéticos, sino que su producción a partir de residuos agroindustriales presenta una ventaja significativa al ser un método de bajo costo y a su vez, incentiva la economía circular.

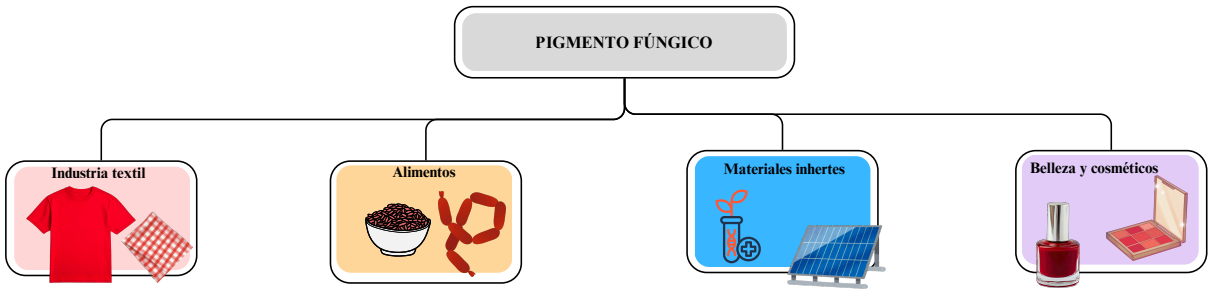
Contenido principal

La producción de pigmentos fúngicos se ve limitada por su alto costo en comparación con las alternativas sintéticas. Para afrontar este desafío, la solución radica en la valorización de residuos agroindustriales. El proceso comienza con un pretratamiento diseñado para liberar y recuperar los nutrientes (azúcares, aminoácidos, minerales).

Estos nutrientes se utilizan para formular un medio de cultivo que favorece el crecimiento del hongo *Talaromyces* y la síntesis de pigmentos, los cuales son posteriormente extraídos y caracterizados para evaluar sus aplicaciones potenciales.



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno



¿Sabías qué? ...

La COFEPRIS ha iniciado el análisis sobre la regulación de los pigmentos sintéticos, sin embargo, el mercado en México está mostrando acciones. La empresa Bimbo, líder en la producción de productos de panificación, anunció su compromiso para eliminar el uso de colorantes sintéticos en sus productos a partir del 2026.

Conclusión

La creciente demanda de pigmentos y la necesidad de encontrar alternativas seguras crean una oportunidad única para impulsar la bioproducción de pigmentos. No solamente son una opción viable, sino que la incorporación de residuos agroindustriales en el proceso los convierte en una solución sostenible, que se alinea directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Referencias "Para saber más"

Ruiz-Sánchez, J. P., Morales-Oyervides, L., Giuffrida, D., Dufossé, L., & Montañez, J. C. (2023). Production of Pigments under Submerged Culture through Repeated Batch Fermentation of Immobilized Talaromyces atroroseus GH2. Fermentation, 9(2). https://doi.org/10.3390/fermentation9020171

Morales-Oyervides, L., Ruiz-Sánchez, J. P., Oliveira, J. C., Sousa-Gallagher, M. J., Méndez-Zavala, A., Giuffrida, D., Dufossé, L., & Montañez, J. (2020). Biotechnological approaches for the production of natural colorants by Talaromyces/Penicillium: A review. In Biotechnology Advances (Vol. 43). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107601

Morales-Oyervides, L., Ruiz-Sánchez, J. P., Oliveira, J. C., Sousa-Gallagher, M. J., Morales-Martínez, T. K., Albergamo, A., Salvo, A., Giuffrida, D., Dufossé, L., & Montañez, J. (2020). Medium design from corncob hydrolyzate for pigment production by Talaromyces atroroseus GH2: Kinetics modeling and pigments characterization. Biochemical Engineering Journal, 161. https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107698

De residuo agrícola a recurso sostenible: Métodos de obtención de fibra del pseudotallo de plátano (Musa Spp.).

M.I.I. Erika Adrianne Bandala Martínez, Dra. Yodaira Borroto Pentón.
Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Introducción

El pseudotallo de plátano (*Musa* spp.),un subproducto agrícola que se genera en grandes volúmenes, a menudo es desaprovechado después de la cosecha de la fruta. Su transformación en fibra lignocelulósica constituye una estrategia para impulsar la bioeconomía circular, diversificar ingresos de productores y mitigar impactos ambientales. La literatura reciente ha documentado avances en la extracción y aprovechamiento de esta fibra, explorando métodos innovadores que buscan maximizar su rendimiento y calidad. Comprender estas tendencias es esencial para diseñar procesos industriales más eficientes, mejorar la sostenibilidad de cadenas productivas y generar oportunidades económicas en sectores textil, papelero, de biocompuestos, de materiales para construcción entre otros.

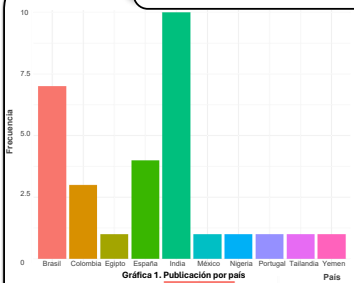
Contenido principal

Se realizó una búsqueda de información en dos bases de datos: Science Direct y Semanthic Scholar. Identificando diversos métodos de extracción de fibra de pseudotallo, incluyendo procesos mecánicos (Cecci, et al., 2020; Sangamithirai, et al., 2020), químicos (Nascimento et al., 2021; Jácome et al., 2022), biológicos y enzimáticos (Subash, et al., 2023), además de combinaciones de éstos que mejoran la eficiencia de recuperación de celulosa (Sangamithirai, et al., 2020; Ardila et al., 2021; Akatwijuka et al., 2023). Destacan la decorticación, la mercerización, la autohidrólisis y los tratamientos hidrotermales verdes, que disminuyen el uso de reactivos. Las fibras resultantes presentan contenidos de celulosa superiores al 65 %, módulos de Young de 3 a 5 GPa (resistencia a la tracción), lo que facilita su incorporación en matrices poliméricas. Esta diversidad metodológica evidencia el avance hacia soluciones sostenibles y la urgencia de estandarizar protocolos para facilitar su escalabilidad industrial.

¿Sabías que…?

- Del pseudotallo del plátano se puede obtener una cantidad considerable de fibra, con propiedades mecánicas y físicas similares a las de las fibras vegetales tradicionales, lo que la convierte en una alternativa sostenible para diversas industrias. (Cecci et al.,2020; Badanayak, et al., 2023).
- Por cada tonelada de plátano se generan cuatro toneladas de residuos agrícolas. (Agricultura, 2023).
- Por cada tonelada de plátano que se cosecha se genera una tonelada de pseudotallo. (Agricultura, 2023).
- Un pseudotallo de 2.5 m de largo, 0.4 m de diámetro y un peso de 40 kg podría rendir aproximadamente 1 kg de fibra utilizable. (Cecci et al., 2020).

Imágenes y gráficas



Gráfica 1. Publicación por país

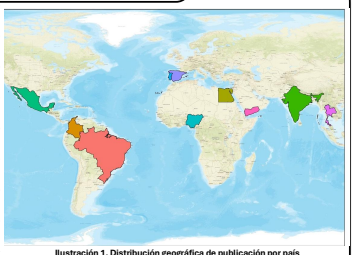
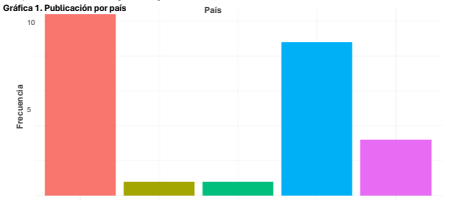


Ilustración 1. Distribución geográfica de publicación por país



Gráfica 2. Publicaciones por tipo de investigación

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Las fibras naturales de pseudotallo de plátano (*Musa* spp.) han demostrado un amplio potencial de uso. En la industria textil, permiten crear hilados para tejidos sostenibles, generando empleos en zonas rurales y sustituyendo el uso de materiales sintéticos de alto impacto ambiental (Sangamithirai & Vasugi, 2020; Subash & Perumalsamy, 2023). En la industria papelera, se confirma su idoneidad para fabricar papel resistente y ecológico (Ardila-Arias et al., 2021), otros autores señalan que se pueden fabricar empaques sin polímeros sintéticos, papeles antidesgarro y piezas moldeadas de pulpa (Cognitive Market Research, 2025). En el sector de los biocompuestos, las fibras mejoran la resistencia mecánica de plásticos y materiales de construcción (VMR, 2025), además de aplicarse en papeles de alta resistencia, paneles acústicos y mezclas asfálticas. Investigaciones recientes exploran su incorporación en alimentos funcionales y en materiales retardantes al fuego, ampliando aún más su rango de aprovechamiento. Estas aplicaciones promueven empleo rural, reducen emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecen cadenas de valor alineadas con la bioeconomía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Conclusión o mensaje final

El pseudotallo de plátano (*Musa* spp.) ha dejado de ser un desecho para convertirse en recurso estratégico. Los métodos combinados de extracción combinan ventajas mecánicas, químicas y enzimáticas, logrando altos rendimientos y fibras de gran pureza y calidad. Se registra un crecimiento constante de investigaciones, enfocadas en aplicaciones industriales y sostenibles. Persisten desafíos como estandarizar procesos, evaluar el ciclo de vida y validar resultados en plantas piloto. La evidencia muestral indica que el aprovechamiento de la fibra puede reducir hasta 40% el consumo de agua y energía respecto de los procesos tradicionales, generar ingresos para productores y consolidar su importancia dentro de la bioeconomía circular y la innovación de materiales sostenibles.

Referencias "Para saber más"

Ardila A., A. N. et al. (2024). Enhanced Cellulose Extraction from Banana Pseudostem Waste: A Comparative Analysis Using Chemical Methods Assisted by Conventional and Focused Ultrasound. Polymers, 16(19), 2785. https://doi.org/10.3390/polym16192785
Nascimento, R. E. A. et al. (2023). Extraction and Characterization of Cellulose Obtained from Banana Plant Pseudostem. Clean Technologies, 5(3), 1028–1043. https://doi.org/10.3390/cleantechnol5030052
Ruangnarong, C. et al. (2024). Evaluation of mechanically extracted banana fibers from pseudostem layers. Heliyon, 10(21), e39880. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39880
Díaz, S. et al. (2021). Assessment of the effect of autohydrolysis treatment in banana's pseudostem pulp. Waste Management, 119, 306–314. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.034
Akatwijuka, O. et al. (2023). Green hydrothermal extraction of banana cellulosic fibers by seawater-assisted media. Cellulose, 30(16), 9989–10008. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05508-x

PROCESOS DE CULTIVO DEL ARROZ MORELENSE

Cynthia Loeza de la Cruz*, Nayeli del Milagro Hernández Barba*, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez*, Edwin Javier Barrios Gómez**
*TecNM / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias

INTRODUCCIÓN

El arroz se conoce científicamente como *Oryza sativa* L.

Contexto nacional: En **México,** el promedio de rendimiento por hectárea es de 7.0 toneladas, con un valor de producción nacional de $1,476 millones de pesos; sin embargo, el país sólo produce el 20.5 % de lo que consume, por lo que depende de importaciones, principalmente de EE.UU., Uruguay y Argentina. (Gobierno de México, 2024)

Consumo per cápita anual: 9.1 kg (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera / SIAP, 2022)

Desde 1988, México dejó de ser autosuficiente en la producción de arroz. (SAGARPA, 2017)

4 *Ocupa el cuarto lugar en la dieta de granos básicos*

2 *Es el 2° grano con mayor gasto familiar* (Gobierno de México, 2024).

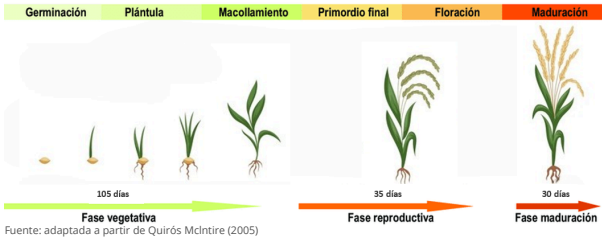
Contexto local: El **Estado de Morelos** ocupa el 8° lugar en producción de arroz nacional, considerado el mejor arroz de México, por su calidad culinaria, debido a que se cultiva de forma artesanal con aborde, trasplante y cosecha manual. (SAGARPA, 2017)

ESTADÍSTICA 2024
Área sembrada: **666 ha**
Producción: **6,921 t**
Rendimiento*: **10 t/ha**
**Superior a la media nacional de 7 t/ha* (SIAP, 2024)

Variedades de arroz: **Morelos A-92, A-98, A-2010 y A-2016**

CONTENIDO

ETAPAS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ



Fuente: adaptada a partir de Quirós McIntire (2005)

CULTIVO DE ARROZ EN MORELOS

Desde **1836**, en Morelos el arroz se cultiva principalmente de forma artesanal, por trasplante. El periodo de siembra-cosecha abarca de febrero a noviembre y el ciclo productivo dura alrededor de 170 días desde el trasplante hasta la cosecha. Los subproductos obtenidos de la producción de arroz son: cascarilla, medio grano, tres cuartos de grano, granillo, salvado y harina (Gobierno de México, 2024).

A PARTIR DE UN ESTUDIO DE CAMPO CON PRODUCTORES AGRÍCOLAS DE JOJUTLA Y COATLÁN DEL RÍO, SE OBTUVIERON LOS SIGUIENTES PROCESOS:

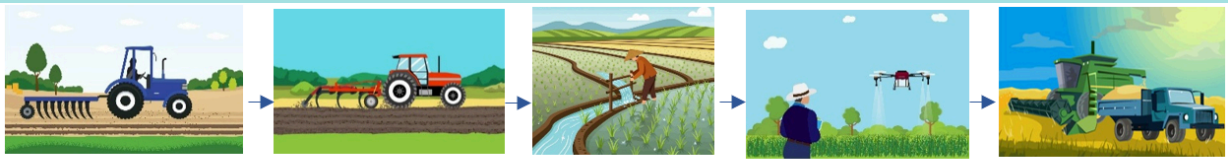
SIEMBRA POR TRASPLANTE BAJO RIEGO

Siembra del almácigo	Preparación del terreno	Trasplante	Fertilización	Cuidado del cultivo	Cosecha
Días 1 – 30	Días 10 – 15	Días 30 – 40	Almácigo: ≈20 dds Terreno definitivo: ≈37 y ≈80 ddt	Días 30 – 170	Día 170

Fases simultáneas

(INIFAP, El arroz en México, 2016 y Solís, J., comunicación personal, 17 de julio de 2025)

SIEMBRA DIRECTA BAJO RIEGO



Preparación del terreno	Siembra y aplicación de herbicida	Riego	Fertilización	Cosecha
Días 1-10	Días 10-11	Días 10-11 – por etapas	Primera: con la siembra o antes Segunda: ≈30 dds Tercera: ≈80 dds Cuarta ≈110 dds	Día 150+

*Días después del trasplante (ddt)
*Días después de la siembra (dds)

(García, O., comunicación personal, 22 de agosto de 2025)

APLICACIONES E IMPACTO EN LA VIDA COTIDIANA

En **Morelos**, existen sólo 85 productores de arroz, comparado con 1,765 de maíz.

PROBLEMÁTICAS
- ⚠ Reducción de superficie sembrada y de producción
- ⚠ Altos costos de producción por su proceso artesanal
- ⚠ Crisis Agroclimáticas

NECESIDAD
- ⚠ Transición hacia la circularidad

MOLINOS Y MARCAS MORELENSES

En la entidad existen cuatro molinos de arroz: Buena Vista de Cuautla, La Perseverancia de Jojutla, Gloria de Morelos de Coatlán del Río y ARMOSA de Puente de Ixtla.

¿Sabías qué...?

Cada **16 de febrero** se celebra el **Día Estatal del Arroz** debido a la obtención de la **Denominación de Origen** en el año 2012.

El taco acorazado, un platillo originario del Estado de Morelos

MENSAJE FINAL

El cultivo de arroz en Morelos enfrenta retos y desafíos como la **escasez de agua y la competencia con cultivos más rentables,** por nombrar algunas.
Por lo anterior, es necesario transitar hacia una agricultura más sostenible. De conformidad con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12: Producción y consumo responsables, se requieren implementar estrategias de economía circular para mitigar el impacto medioambiental y fortalecer la resiliencia del campo morelense.

PARA SABER MÁS...

- INIFAP "El arroz en México"(2016). ISBN: 978 607 370584 4
- INIFAP "Variedades de Arroz". ISBN: 978 607 37 14396
- INIFAP "Paquetes tecnológicos para el cultivo de arroz en México". ISBN: 978 607 370419 9
- Balderas, L. "Corazón de arroz". ISBN: 978-607-8658-32-9
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- SAGARPA. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030.

Deserción estudiantil, la inclusión de los diversos factores de la población del TecNM Campus Iztapalapa III.

Brenda E. Benítez M., Vitervo López C., Jesús Arce L.

Tecnológico Nacional de México/ Campus Iztapalapa III/ CENIDET

Problemática

En la actualidad, la deserción estudiantil representa una de las problemáticas más apremiantes y recurrentes para la mayoría de las Instituciones de Educación Superior (IES). Esta preocupación se fundamenta en la elevada tasa de abandono que se concentra especialmente durante los primeros años de las trayectorias académicas, impactando tanto a los estudiantes afectados como al desarrollo social y económico del país.

Justificación

La presente investigación aborda una problemática en el ámbito de la educación superior, la predicción del éxito o fracaso académico de estudiantes universitarios. En un contexto donde las Instituciones de Educación Superior (IES) buscan optimizar el rendimiento estudiantil y reducir la deserción, se justifica por su capacidad de cerrar la brecha entre la teoría y la práctica, ofreciendo soluciones analíticas con aplicabilidad directa en entornos educativos reales y cumplir con la responsabilidad de formar a la próxima generación de líderes y profesionales.

Objetivos

General Analizar datos académicos y educativos, para identificar los factores clave que influyen en la deserción estudiantil y desarrollar estrategias predictivas que permitan a la institución tomar decisiones preventivas y eficaces para la reducción del abandono escolar.

Específicos a) Revisar y seleccionar las preguntas del cuestionario para diseñar el formulario. b) Aplicar técnicas de visualización de datos para identificar tendencias y agrupaciones de datos. c) Interpretar y analizar los resultados del modelo de minería de datos para que muestre las conclusiones clave para que el Tecnológico de Iztapalapa III las utilice en la toma de decisiones.

Metodología

Se visualizan las fases y los procedimientos aplicados en el Tecnológico de Iztapalapa III (Fig. 1). Como Fase 1, se elaboró un instrumento de recolección de datos (Fig. 2) para capturar la información detallada sobre diversos factores que influyen en el fenómeno de estudio. En la Fase 2, se aplicó una técnica de preprocesamiento de datos (Fig. 3) denominada OneHotEncoder para convertir variables categóricas a una representación numérica binaria. En la Fase 3, se aplicaron algoritmos de reducción de dimensiones y de agrupamiento de objetos (clustering), para descubrir patrones y estructuras ocultas dentro del conjunto de datos (Fig. 4). Y la Fase 4, el experto en datos analiza los hallazgos de los modelos, los contextualiza y traduce en recomendaciones prácticas y accionables para el cliente.

Resultados

El análisis de datos con K-means y PCA identificó tres grupos óptimos de estudiantes (Fig. 5). Dos grupos (2 y 3) presentan un perfil de éxito (alto rendimiento, apoyo familiar y percepción institucional favorable). Y el grupo (1) exhibe un perfil de riesgo por potencial de desvinculación emocional/académica. La detección de este grupo de riesgo exige la implementación urgente de intervenciones focalizadas, incluyendo orientación psicológica especializada y acompañamiento institucional continuo, con el fin de mitigar la deserción y garantizar el éxito formativo.

Contacto

m23ce119@cenidet.tecnm.mx
brenda.bm@iztapalapa3.tecnm.mx

Conclusiones

El estudio utilizó una muestra de 430 estudiantes del Tecnológico Nacional de México Campus Iztapalapa III y un cuestionario validado (V de Aiken y Alfa de Cronbach). Para el análisis, se usó PCA para reducir la dimensionalidad y K-means (optimizando con los métodos del codo y silueta) para agrupar a los estudiantes. Esto identificó un grupo con riesgo de desvinculación emocional y/o académica, sugiriendo intervenciones. Finalmente, se entrenaron y compararon modelos de aprendizaje supervisado (LR, RF, MLP y SVM), destacando MLP, SVM y LR por su desempeño superior, el cual se evaluó con matrices de confusión y métricas estándar.

Fig. 1 Fases de la Metodología

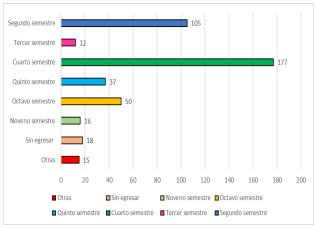


Fig. 2. La recolección de los Datos

```
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import OneHotEncoder
data = {
    "Promedio": [
    "5 o menos reprobado",
    "6 suficiente",
    "7 aprobado",
    "8 bien",
    "9 notable",
    "10 sobresaliente",
    ]
}
df = pd.DataFrame(data)
# inicializar el codificador OneHotEncoder
encoder = OneHotEncoder(sparse_output=False)
# Aplicar codificación OneHotEncoder
encoded = encoder.fit_transform(df[["Promedio"]])
# Convertir a DataFrame con nombres de columnas
encoded_df = pd.DataFrame(
    encoded,
    columns=encoder.get_feature_names_out(["Promedio"]))
# Concatenar los resultados
final_df = pd.concat([df, encoded_df], axis=1)
# Mostrar resultados
final_df
```

Fig. 3 Preprocesamiento de los Datos

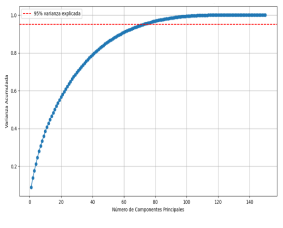


Fig. 4 Modelo Curva de la varianza explicada acumulada.

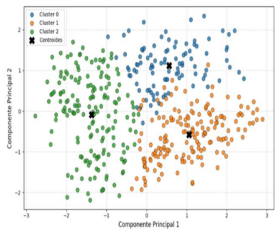


Fig. 5 Visualización de los grupos con el algoritmo K-means después de aplicar PCA.

Referencias

[1] Alhazmi, E., & Sheneamer, A. (2023). Early predicting of students performance in higher education. *IEEE Access*, *11*, 27579–27589. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250702

[2] Camones Gonzales, V. A. N. S. F. C., Sihuay Fernandez, M. T., & Caballero, J. E. A. P. (2024). Minería de datos: Un enfoque perspectivo desde el contexto educativo. *Revista Tribunal*, *4*(9). https://doi.org/10.59659/revistatribunal.v4i9.70

[3] Pérez-Gutiérrez, B. R. (2025). Vista de comparación de técnicas de minería de datos para identificar indicios de deserción estudiantil, a partir del desempeño académico. *Revista UIS Ingenierías*. https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/9834/10291.

[4] Gutiérrez-Monsalve, J. A., Garzón, J., & Segura-Cardona, A. M. (2021). Factors associated to academic performance in university students. *Formación Universitaria*, *14*(1), 13–24. https://doi.org/10.4067/S0718-50062021000100013

[5] Durán, R. P., Berniell, L., Llambí Por DGE Mendoza, A. H. C., Olivera, M., & Ontivero Paula Ortega Grebenc, L. J. (2023). *Alertas tempranas para prevenir el abandono escolar: el caso de la Provincia de Mendoza*. [Reporte o informe]. www.humaga.com.ar

[6] Cotrina-Teatino, M. A., Riquelme Sandoval, A. I., Guartan Medina, J. A., & Marquina Araujo, J. J. (2025). Machine Learning aplicado a la exploración minera usando matriz de confusión. *Revista Ciencia y Tecnología*, *21*(1), 63–74. https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2025.01.06

Desigualdad digital en México: acceso y rezago tecnológico

Lic. Miguel Isset González Martínez*, Dra. Gabriela Maqueda Rodríguez**
* Tecnológico Nacional de México. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Maestría en Gestión Administrativa. 202421220@tese.edu.mx, https://orcid.org/0009-0004-5529-5261
** Tecnológico Nacional de México. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Maestría en Gestión Administrativa. gabymaqueda@tese.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-9374-3027

Introducción

La brecha digital limita el desarrollo social, educativo y económico. En México, el acceso a internet se ha convertido en un indicador crítico cuyo carácter desigual refleja profundas disparidades regionales y sociales.

Diversos estudios destacan que la infraestructura de telecomunicaciones está estrechamente vinculada con el crecimiento económico (Del-Valle-Soto et al., 2024) y que el acceso a internet contribuye a reducir la pobreza en zonas rurales (World Development, 2021). No obstante, se ha documentado que persisten marcadas desigualdades entre entidades federativas, a pesar del avance de la telefonía móvil (Coria & García-García, 2022), y que las comunidades marginadas continúan rezagadas en la disponibilidad de Tecnologías de la Información y Comunicación (Toudert, 2022).

Los datos más recientes confirman la magnitud de esta brecha: en 2023, el 85.5% de los hogares urbanos contaba con acceso a internet, mientras que en las zonas rurales apenas alcanzaba el 66%, pese a iniciativas gubernamentales como Internet para Todos.

En este trabajo se presentan y analizan indicadores que permiten dimensionar el acceso a internet y tecnologías en los hogares, con el propósito de identificar elementos que contribuyan al cierre de la brecha digital en México.

Diseño metodológico

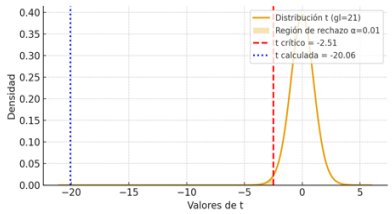
- **Fuente de datos:** Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares, ENDUTIH (INEGI, 2023).
- **Variables analizadas:** Computadora (Comp); Energía Eléctrica (EE); Acceso a Internet (INT); Radio (RAD); Teléfono fijo (TEL); Televisión (TV); Televisión de paga (TVP)
- **Muestra:** Hogares mexicanos encuestados a nivel nacional con acceso a internet, televisión, radio, telefonía y otros servicios.
- **Técnicas estadísticas aplicadas:**

  Prueba T de Student: comparación de medias de acceso tecnológico entre grupos (ej. hogares con Internet vs. hogares con TV).

  ANOVA: identificación de diferencias significativas en el acceso a tecnologías entre distintos niveles de disponibilidad tecnológica en los hogares.
- **Herramienta utilizada:** Lenguaje estadístico y gráfico R.

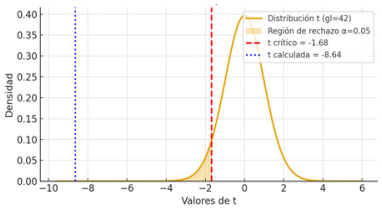
Gráficas

Gráfica 1. Acceso a internet en los hogares de México (2023)



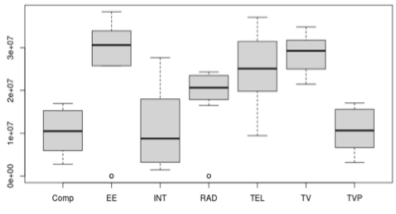
Formulación hipótesis para una población
Ho: μ ≥ 48 millones de hogares con acceso a internet (aceptada)
Ha: μ ≤ 48 millones de hogares con acceso a internet (rechazada)

Gráfica 2. Acceso a televisión y acceso a internet (2000–2022)



Formulación hipótesis para dos poblaciones
Ho: μ1 ≥ μ2 (rechazada)
Ha: μ1 ≤ μ2 (aceptada)

Grafica 3. Acceso a diferentes tecnologías en los hogares



Formulación de hipótesis de prueba ANOVA
Ho. μ1 = μ2 = μ3= μ4= μ5= μ6= μ7= μ8=… μn
Ha. Al menos un tipo de equipamiento de tecnología promedio de los analizados es diferente.

Resultados

En la Gráfica 1 se observa que, en 2023, el acceso a internet alcanzó a 48 millones de hogares en México, una cifra elevada, aunque todavía inferior al acceso a la televisión en el mismo año.

La evolución histórica mostrada en la Gráfica 2 confirma que, durante los últimos 22 años, la televisión ha mantenido un nivel de acceso significativamente mayor que el internet en los hogares mexicanos. La prueba t de Student evidencia estas diferencias significativas entre ambos servicios.

Los resultados obtenidos evidencian que el acceso promedio a las diferentes tecnologías en los hogares mexicanos es heterogéneo. Se observa una amplia cobertura en servicios como energía eléctrica, televisión, telefonía y radio, mientras que el acceso a internet se mantiene en un nivel considerablemente inferior (Gráfica 3).

El contraste estadístico mediante ANOVA permitió rechazar la hipótesis nula (Ho) y aceptar la hipótesis alternativa (Ha), lo que confirma la existencia de diferencias estadísticamente significativas en los niveles de acceso a las distintas tecnologías de los hogares.

Conclusiones

El análisis estadístico revela que la brecha digital en México persiste y se acentúa por desigualdades regionales y temporales. Mientras las zonas urbanas y del norte del país registran altos niveles de conectividad, el sur y las áreas rurales mantienen rezagos significativos. Esta disparidad evidencia la necesidad de una estrategia integral de infraestructura, capacitación digital y políticas públicas de conectividad basadas en el principio de equidad digital.

Resulta fundamental integrar, a nivel nacional, elementos estratégicos para el cierre de la brecha digital, particularmente aquellos basados en la infraestructura inclusiva, la alfabetización digital, el acceso equitativo y la gobernanza integral, pilares que permiten articular acciones orientadas a reducir las desigualdades tecnológicas.

Referencias

Coria, J., García, A. (2022). *Digital divide across Mexican states: ICT access inequalities 2010–2020*. arXiv preprint. https://arxiv.org/abs/2211.00073

Del-Valle, C., García, J., López, J. A., Aguilar, J. (2024). *Telecommunications infrastructure and economic growth: Predictive models for regional policy in Mexico*. Telecom, 5(4), 55. https://doi.org/10.3390/telecom5040055

González, A., Espinoza, F. (2020). *La brecha digital de género en América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2023). *Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH) 2023*. https://www.inegi.org.mx/programas/endutih/2023/

Toudert, D. (2022). *Digital divide and marginalization contexts in Mexico: A decade of evolution*. Cuadernos.info, 51, 1–25. https://doi.org/10.7764/cdi.51.34852

World Development, (2021). *Internet access and poverty reduction: Evidence from rural regions*. 138, 105278. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105278

PROTOTIPO AUTOMATIZADO PARA CONTEO DE TAPAS PLÁSTICAS

Ruíz Vidal Josué Jared*, García Enríquez Irma Josefina*, Bautista Bautista Alberto Nicolás*, Medrano Espinoza Rodolfo*
* Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz.

Introducción

En muchas fábricas de plásticos, el conteo de tapas se realiza de manera manual o por pesaje, lo que provoca errores, pérdidas de tiempo y productos mal empacados.
Para resolver este problema, se diseñó un prototipo tecnológico que cuenta tapas plásticas automáticamente. El sistema utiliza sensores que detectan cada tapa, una tolva que las ordena y una pantalla donde el operario puede ver el número exacto en tiempo real.
Este proyecto busca hacer más rápido y preciso el proceso de empaque, reducir retrabajos y mejorar la calidad del producto que llega al cliente.

Sección "¿sabías que…?"

- ✓ El conteo de tapas plásticas genera errores de hasta 10% debido a variaciones en el peso, afectando la satisfacción del cliente.
- ✓ Los sensores capacitivos detectan materiales no metálicos como el polietileno (HDPE) sin contacto, con una precisión >98%
- ✓ El protocolo Modbus TCP/IP permite comunicación rápida entre PLC y HMI, actualizando datos en milisegundos.
- ✓ Una tolva vibratoria compacta puede alimentar hasta 60 tapas por minuto sin atascos, ideal para espacios reducidos.

Contenido principal

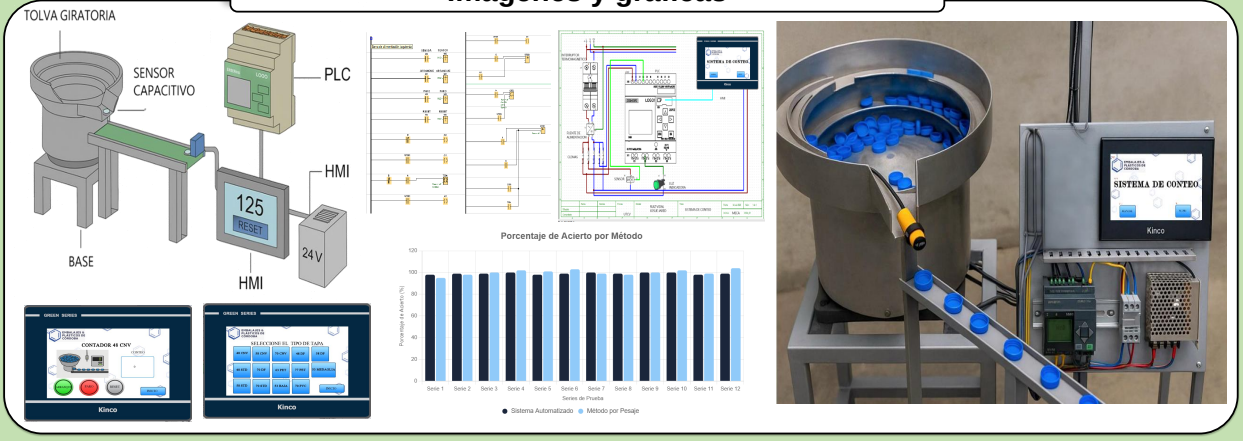
¿Por qué contar tapas es un desafío?
En el empaque, contar tapas a mano o por peso es como adivinar cuántos dulces hay en una bolsa: se cometen errores y hay retrasos, lo que afecta la calidad y la eficiencia.

¿Qué se creo para solucionarlo?
Se diseñó un sistema semiautomatizado con PLC (el "cerebro"), sensores capacitivos (los "ojos"), una tolva vibratoria (que "acomoda" las tapas) y una HMI (el "marcador"), asegurando conteos precisos.

¿Cómo funciona este sistema?
Funciona como un marcador de juego: cada tapa que pasa es detectada por los sensores, y la HMI muestra el conteo en tiempo real. La tolva organiza el flujo, y el operario puede reiniciar con un solo botón.

¿Qué beneficios trae?
Es como pasar de caminar a andar en bicicleta: reduce tiempos, minimiza errores, asegura la calidad, facilita el trabajo al operador.

Imágenes y gráficas



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

El sistema automatizado para contar tapas plásticas desarrollado para la empresa, tiene un impacto directo en la vida cotidiana al mejorar la producción de empaques que usamos todos los días, como tapas de botellas de agua, refrescos o envases médicos. Este prototipo asegura que cada paquete tenga la cantidad exacta de tapas, evitando errores que podrían causar molestias, como recibir menos producto del esperado. Al reducir tiempos y desperdicios, las empresas pueden ofrecer productos más confiables y económicos, beneficiando a consumidores y comercios. Además, al liberar a los trabajadores de tareas repetitivas, el sistema promueve un ambiente laboral más seguro y menos agotador. En el futuro, esta tecnología podría conectar con aplicaciones móviles para monitorear la producción en tiempo real, facilitando un control más eficiente en fábricas.

Conclusión o mensaje final

Con este sistema automatizado para contar tapas plásticas, la empresa da un paso hacia una producción más precisa y eficiente. Al combinar un PLC, sensores y una pantalla HMI, no solo se reducen errores y tiempos, sino que se mejora la calidad de los empaques que usamos diario, como botellas y envases. Es un inicio prometedor que, con futuras mejoras como el IoT, puede transformar las fábricas en espacios más inteligentes y sostenibles, beneficiando a trabajadores, empresas y consumidores por igual.

¡El futuro de la manufactura está aquí!

Referencias "Para saber más"

Flores García, E., Quezada Quezada, J. C., Calderón Medina, R. V. H., & González Ángeles, J. M. (2022). Sistema de control automático basado en PLC y HMI para una máquina estribadora. *Boletín Científico INVESTIGIUM De La Escuela Superior De Tizayuca*, *8*(15), 43–47.

Podmores. (2021). Automated parts counting machines for high accuracy and throughput. https://www.podmores.com/products/counting-machines

Lee, C., Kim, Y., & Kim, H. (2024). Computer-vision-based product quality inspection and novel counting system. Applied System Innovation, 7(6), 127.

Tapete Interactivo: Una Herramienta Bilingüe para la Preservación del Mixteco

Morán Rosete Mariana, Castillo Ramírez Lizet Nataly, Cortés-Martínez Keila Vasthi
*Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, Puebla, México.

Introducción

En la comunidad de Santiago Petlacala, el mixteco se encuentra en riesgo debido a que las nuevas generaciones lo utilizan cada vez con menor frecuencia. Ante esta situación, resulta urgente diseñar estrategias didácticas e innovadoras que promuevan el aprendizaje y uso de la lengua. Una propuesta es el desarrollo de un tapete interactivo que permita a los niños aprender y practicar el mixteco desde edades tempranas mediante sonidos, palabras y actividades lúdicas. Este recurso no solo fortalecería sus habilidades lingüísticas, sino que también fomentaría el orgullo cultural y el arraigo a la identidad comunitaria, asegurando la preservación del patrimonio

Contenido Principal

Se buscó integrar iconos bordados, emitir sonidos en mixteco y español al presionar los botones de las imágenes y palabras escritas en ambos idiomas, lo que permite trabajar la compresión auditiva, la escritura y la pronunciación de manera didáctica.
Este proyecto demostró que es posible combinar la tecnología con la enseñanza de lenguas originarias de forma exitosa, este tipo de herramientas pueden ser clave para evitar que lenguas indígenas sigan desapareciendo, y al mismo tiempo fortalecer la identidad cultural desde la infancia.

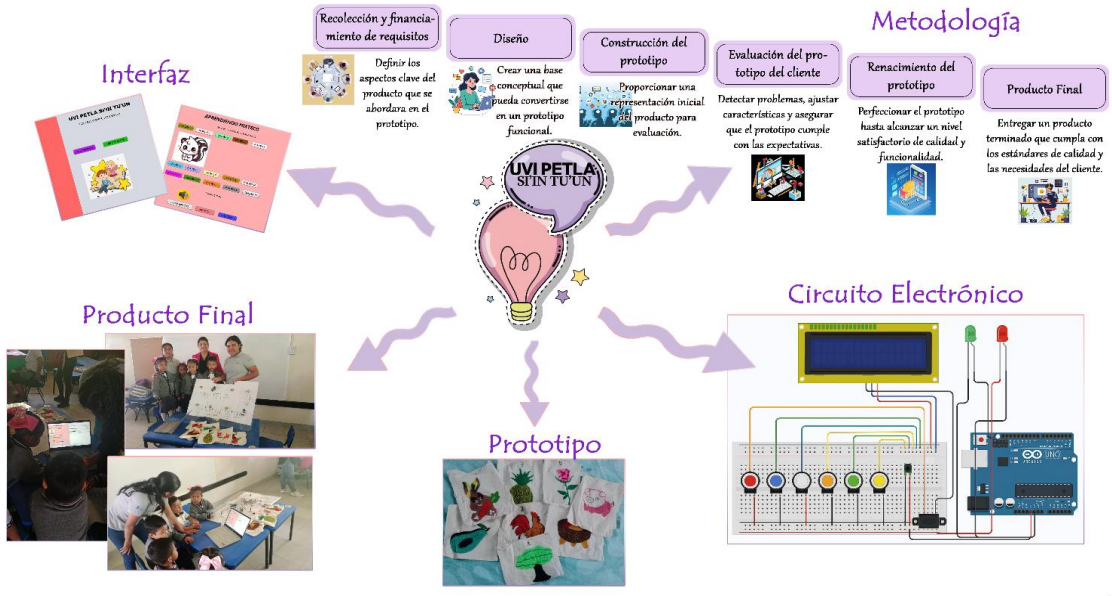
Aplicación en Entorno

El tapete interactivo representa una herramienta innovadora para promover el aprendizaje del mixteco en niños y jóvenes, integrando la lengua en actividades lúdicas y educativas. Además, contribuye a fortalecer la identidad cultural y la conexión con sus raíces dentro de la comunidad de Santiago Petlacala, ofreciendo una alternativa tecnológica que hace que aprender y practicar el mixteco sea divertido, dinámico y accesible, superando las limitaciones de los métodos de enseñanza tradicionales

¿Sabias que...?

Un tapete interactivo que combina hardware y software transforma el aprendizaje del mixteco en una experiencia divertida y tecnológica, permitiendo que los niños se acerquen a su cultura y patrimonio lingüístico de manera lúdica.

Imágenes y Gráficas



Conclusion o mensaje final

El tapete interactivo en lengua mixteca representa una propuesta innovadora que combina tecnología y cultura para enfrentar el riesgo de pérdida lingüística. El uso de Arduino Uno y Java para integrar sensores, sonidos e imágenes, logró despertar el interés de estudiantes y comunidad hacia el aprendizaje de la lengua, mostrando que la tecnología puede ser aliada en la preservación cultural.
Los resultados evidencian que este tipo de herramientas no solo fortalecen la motivación, sino que también abren nuevas posibilidades para la enseñanza en contextos escolares y comunitarios. Aunque se identificaron limitaciones como el repertorio inicial reducido y la necesidad de mayor validación, el proyecto sentó bases sólidas para futuras mejoras e implementaciones más amplias.

Para Saber más

*Agudelo, E. (2018). Recursos didácticos digitales (TAC) de aprendizaje autónomo para el fortalecimiento de la competencia aprender a aprender en niños entre nueve y diez años de edad [Trabajo de grado]. Corporación Universitaria Minuto de Dios. https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/760f2cd5-4652-42bf-9c4e-0817a5f9c6d4/content
*Herrera, C. (2019). La pérdida de las lenguas indígenas. Umma. https://www.academia.edu/38601873/La_p%C3%A9rdida_de_las_lenguas_Indigenas
*Bennett, L. (2024, 13 de agosto). Prototype Model in Software Engineering. Guru99. https://www.guru99.com/es/software-engineering-prototyping-model.html
*Ciclo de un Prototipo. (s. f.). INGENIERIA DE SOFTWARE. https://ingsoftware.weebly.com/ciclo-de-vida-de-un-prototipo.html

Aplicaciones energéticas de las manganitas de lantano

Julio César Cázares Gómez*,,Rafael Guillermo Suárez Nájera**, Armando Reyes Montero**,Luis Antonio García Contreras**, Edilso Reguera Ruiz***, José Álvaro Chávez Carvayar****

* Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de exterior S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacan, Ciudad de México
** Instituto de Investigaciones en Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de exterior S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacan, Ciudad de México
*** Centro de Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnologías Avanzada ,Instituto Politécnico Nacional, Calzada Legaria 694. Col. Irrigacion, Miguel Hidalgo, C.P. 11500. Ciudad de México, CDMX

Introducción

Los compuestos de manganita de lantano ($LaMnO_3$) corresponden a la familia estructuras cristalinas denominadas perovskitas cuya formula química es ABO_3; donde A y B son cationes de diferente tamaño, A es un catión más grande que el catión B.[4]

Las $LaMnO_3$ presentan dependencia de sus fases magnéticas en función con la temperatura. A baja temperatura y por debajo de la temperatura de Néel (~140K), el compuesto se comporta como antiferromagnético; a temperaturas mayores se comporta como paramagnético.[3]

Además, la manganita de lantano puede presentar estructuras cristalinas cúbica, ortorrómbica y romboédrica dependiendo de las condiciones de temperatura, presión hidrostática y variaciones estequiométricas. El compuesto $LaMnO_3$ se sintetiza mediante los métodos de sol-gel, mecanosíntesis, co-precipitación principalmente.[7][6]

Propiedades

Estructura	Ortorrómbica	Cúbica	Romboédrica
Fase magnética	Anti ferromagnético	Ferromagnético	Ferromagnético
Temperatura de Néel (T_N)	~140 K	-	-
Temperatura de Curie (T_C)	~250 a 380 K (dopada)	-	-
Transición estructural (T_S)	750 K	1010 K	-
Banda de energía prohibida	1.16 eV	2.93 eV	4.15 eV

Tabla1. Propiedades de las manganitas de lantano. Datos obtenidos de [3].

¿Sabías que…?

Antiferromagnétismo: La fase antiferromagnética se caracteriza por la formación de dos o más subredes magnéticas. Los momentos magnéticos atómicos se alinean de forma antiparalela.[1]

Temperatura de Néel: La Temperatura de Néel marca el punto donde la energía térmica supera el orden magnético que mantiene una fase antiferromagnética. Por encima de T_N, el orden de los magnéticos atómicos se ven reducidos, por lo cual el material adopta un comportamiento paramagnético.[2]

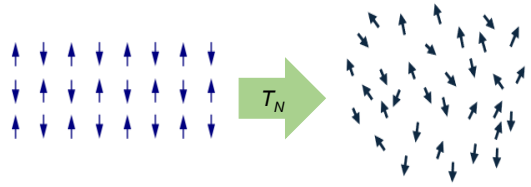


Figura 1.Esquema de los momentos magnéticos ordenados (Antiferromagnetismo) a un estado desordenado (Paramagnético). (CCO)

$LaMnO_3$

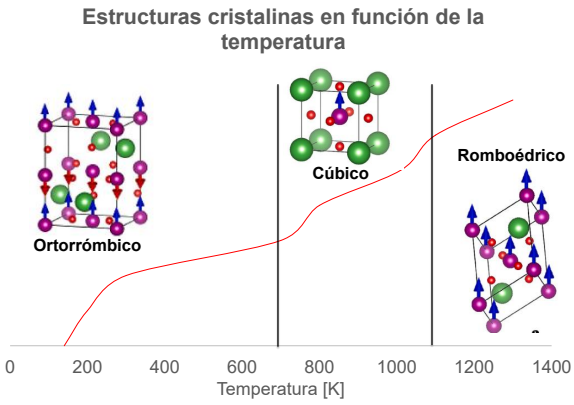


Figura 2 . Estructuras cristalinas en función de la temperatura; adaptada de [3].

Aplicaciones

- **Celdas de combustible:** Su función es facilitar la reacción de reducción de oxígeno, se comporta como cátodo, que es crucial para generar portadores de carga.[5][6]
- **Imanes permanentes:** Cuando se dopan con elementos como el Ca, Sr, Ag y otros se vuelven ferromagnéticos.[5]
- **Electrónica y espintrónica:** Materiales de interés para desarrollar nuevos dispositivos electrónicos que aprovechan momento magnético intrínseco de los electrones (espín).[3]
- **Refrigeración magnética:** Esta tecnología es una alternativa más eficiente y ecológica a los métodos de compresión de gases tradicionales. El cual aprovecha los cambios térmicos debido a transiciones de orden-desorden magnético.[7]

Conclusiones

Los compuestos basados en $LaMnO_3$, son materiales con propiedades físicas interesantes, entre las más relevantes está su comportamiento magnético que cambia con la temperatura. Así también, sus propiedades eléctricas, donde presenta una banda de energía prohibida ~1.16 eV en su fase semiconductora, a bajas temperaturas. Además, su comportamiento conductor-aislante depende del espín principalmente; lo cual esta relacionado con la temperatura o al campo magnético aplicado.

Por esta razón, los materiales que usan como base $LaMnO_3$ tienen potenciales aplicaciones en diversas áreas de la tecnología energética y electrónica. Sin embargo, actualmente tal compuesto se encuentra en investigación para su potencial uso comercial. Por lo cual su precio no es competitivo en el mercado actual.

Para saber más

Los invitamos a visitar el laboratorio Nuevos Materiales Cerámicos Nanoestructurados (NUMACEN), en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM (IIM-UNAM); así como leer los siguientes artículos:

[1] *Encyclopædia Britannica. (s. f.). Antiferromagnetism.* Recuperado 28 de septiembre de 2025, de https://www.britannica.com/science/antiferromagnetism
[2] Sciencedirect. (s. f.). Neel Temperature - an overview. Recuperado 28 de septiembre de 2025, de https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/neel-temperature
[3] Koriba, I., Lagoun, B., Guibadj, A., Belhadj, S., Ameur, A., & Cheriet, A. (2021). *Structural, electronic, magnetic and mechanical properties of three LaMnO3 phases: Theoretical investigations. Computational Condensed Matter,* 28, e00592. https://doi.org/10.1016/j.cocom.2021.e00592
[4] Dawa, T., & Sajjadi, B. (2024). *Exploring the potential of perovskite structures for chemical looping technology: A state-of-the-art review. Fuel Processing Technology,* 253, 108022. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.108022
[5] Bolarín, A. M., Sanchez, F., Ponce, A., & Martínez, E. E. (2007). *Mechanosynthesis of lanthanum manganite. *Journal of Alloys and Compounds.* doi:10.1016/j.msea.2006.12.062
[6] Zhang, Q., & Saito, F. (2000). *Mechanochemical synthesis of $LaMnO_3$ from La_2O_3 and Mn_2O_3 powders. Journal of Alloys and Compounds.* https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00606-4
[7] Biswas, A., Chandra, S., Phan, M.-H., & Srikanth, H. (2012). *Magnetocaloric properties of nanocrystalline $LaMnO_3$: Enhancement of refrigerant capacity and relative cooling power. Journal of Alloys and Compounds.* http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.001

Batería de flujo por electrodiálisis: una alternativa sostenible para almacenar la energía renovable.

Leonardo Javier Rios Chavez[1], Jarniel García Morales[1], Leonardo de Silva Muñoz[2], Marisol Cervantes Bobadilla[1], Emmanuel Olmos Barba[1]
1. Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
2. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

INTRODUCCIÓN

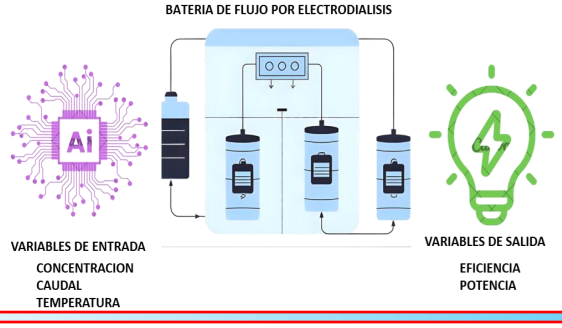
Las energías renovables son clave para combatir el cambio climático. Sin embargo, se ven afectadas por su intermitencia lo cual impacta de forma negativa en la generación de energía. Por lo que es importante integrar sistemas de almacenamiento para disminuir su intermitencia. Existen diversos métodos de almacenamiento de energía : mecánicos, térmicos, químicos, electromagnéticos, no obstante el almacenamiento electroquímico es el que ha recibido mayor atención por la comunidad científica en los últimos años debido a su fiabilidad y la no dependencia de una ubicación geográfica especifica.(3)

¿QUÉ SON LAS BATERÍAS DE FLUJO POR ELECTRODIÁLISIS?

En este concepto, la energía se almacena mediante la disociación de soluciones de electrolitos salinos simples en sus correspondientes soluciones ácido, base, sal y redox por medio de membranas de intercambio iónico de alto rendimiento.(1)

¿CUÁLES SON NUESTROS DESAFÍOS?

En esta propuesta uno de los desafíos es la eficiencia de la batería que depende de la conductividad y concentración de las soluciones salinas, del desempeño de las membranas de intercambio iónico y del régimen de flujo entre los compartimientos. En este trabajo **monitorearemos** estas variables para construir un **modelo basado en datos** mediante **redes neuronales artificiales** y, con él, **diseñar una estrategia de control** que mantenga la **eficiencia objetivo** mediante la **manipulación de las variables clave**.



PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se piensa construir una herramienta que opere con una red neuronal que, con datos reales, prediga potencia y eficiencia y, sobre esa base, recomiende condiciones de operación (concentración de la solución, caudales, temperatura) para alcanzar un objetivo de (máxima eficiencia o potencia), respetando límites hidráulicos y térmicos.

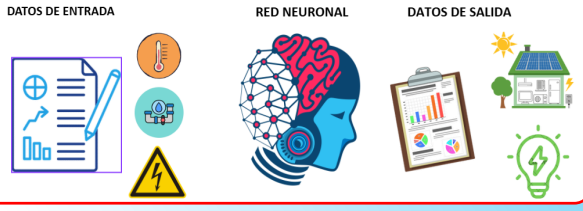


TABLA 1. BATERÍAS: FLUJO POR ELECTRODIÁLISIS Y FLUJO REDOX

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Vida útil típica (ciclos)	Madurez/uso recomendado
Electrodiálisis	• No contienen electrolitos inflamables, lo que reduce el riesgo de incendio o explosión. • Escalabilidad por tanques. • Eficiencia energética. • Flexibilidad de operación. • Potencia y energía desacopladas vida muy larga 100% DoD sin daño. • Seguridad y estabilidad. • Sostenibilidad.	Baja eficiencia 30-50 %(Pilotos) Mayor costo inicial. Costo elevado de materiales.	En desarrollo depende de membranas.	Baja/solo proyectos demostrativos.
Flujo redox (Vanadio/hierro)		Menor densidad de energía bomba y balance de planta ;CAPEX inicial alto (Vanadio caro)	≥10,000	Media-Alta. Larga duración (≥4-12h),ciclos intensivos y vida multianual.

¿SABÍAS QUÉ?

Las baterías de flujo por electrodiálisis pueden generar electricidad a partir de la diferencia de concentración entre agua salada y agua dulce a este fenómeno se le conoce como energía azul y puede aprovechar los recursos naturales para obtener energía limpia. (2)

CONCLUSIÓN

Las baterías de flujo por electrodiálisis es una de las tecnologías de almacenamiento de energía más prometedoras para un futuro descarbonizado que contribuye a una nueva forma de almacenamiento de energía contribuyendo a nuevas investigaciones de tecnología para empezar a realizar una transición energética y depender lo menos posible de los combustibles fósiles.

REFERENCIAS

1. Romero Castañon, T., Díaz Guillén, M. R., de Silva Muñoz, L., & González Díaz, A. (2024). *Sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías de flujo.* Transición Energética. https://transicionenergetica.ineel.mx/Revista.mvc/DT3n12
2. ESingeniería. (2025). *Electrodiálisis Inversa: Energía Azul a partir de Salmuera.* https://esingenieria.net/electrodialisis-inversa/
3. Wang, D., Liu, N., Chen, F., Wang, Y., & Mao, J. (2024). Progress and prospects of energy storage technology research: Based on multidimensional comparison. *Journal of Energy Storage, 75*, 109710. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109710

Celdas de combustible

Gabriel Barrón Ruíz *,**, Luis Antonio García Contreras **, Rafael Guillermo Suárez Nájera **, José Álvaro Chávez Carvayar**
* Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
** Instituto de Investigaciones en Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México.

Introducción

La necesidad de contar con una energía limpia y eficiente es, actualmente, un reto económico y tecnológicamente crítico. Las celdas de combustible son dispositivos capaces de convertir la energía química de un combustible directamente en electricidad, sin que medie algún proceso de combustión, tienen un bajo impacto ambiental y una alta eficiencia. Operan con una mayor eficiencia que los motores de combustión, con valores que pueden alcanzar más del 60%, con emisiones dañinas casi nulas, lo que contribuye a la disminución de gases de efecto invernadero y a una reducción en la contaminación ambiental.

Funcionamiento

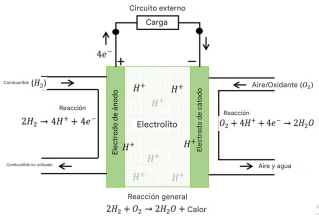


Figura 1. Esquema del funcionamiento de una celda de combustible tipo *PEM* [2].

Las celdas de combustible básicamente constan de dos electrodos, cátodo y ánodo, separados por un electrolito. Para una celda *PEM*, por ejemplo, el combustible (H_2) se suministra a través del ánodo mientras que el oxígeno o aire se suministra al cátodo. Un catalizador separa las moléculas de H_2 en protones y electrones, los electrones fluyen a través de un circuito externo que conecta el ánodo con el cátodo, mientras que los protones migran a través del electrolito hasta el cátodo donde se unen con el oxígeno y los electrones para producir agua y calor.

Celdas de combustible

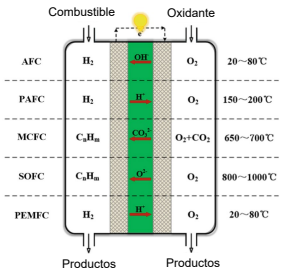


Figura 2. Diagrama esquemático de las celdas de combustible, su temperatura de funcionamiento y el principio de operación de los diferentes tipos de combustible [4].

¿Sabías que…?

Existen diferentes tipos de celdas de combustible según el electrolito utilizado, entre paréntesis están los nombres de las celdas por sus siglas en inglés

- Celdas de combustible alcalinas (*AFC*).
- Celdas de combustible de ácido fosfórico (*PAFC*).
- Celdas de combustible de carbonato fundido (*MCFC*).
- Celdas de combustible de metanol directo (*DMFC*).
- Celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (*PEMFC*).
- Celdas de combustible de óxidos sólidos (*SOFC*).

Aplicaciones

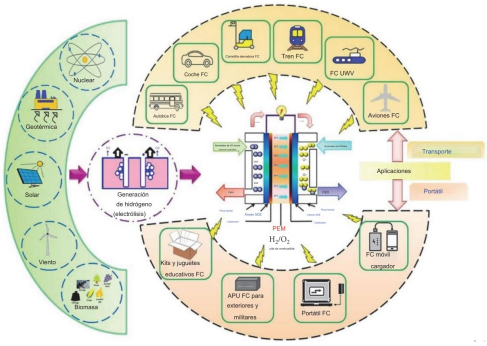


Figura 3: Diagrama que ilustra las diferentes aplicaciones de las celdas tipo *PEM* y los diferentes métodos de producción del combustible [3].

Algunas aplicaciones de las celdas de combustible se presentan en la siguiente tabla.

AFC	Transporte, energía de respaldo, sector militar y aeronáutica.
PAFC	Generación de energía estacionaria.
MCFC	Servicios públicos eléctricos y generación distribuida.
SOFC	Compañías eléctricas y generación de energía distribuida.
PEMFC	Generación de energía y transporte.
DMFC	Dispositivos electrónicos portátiles, vehículos de corto alcance y aplicaciones militares.

Conclusiones

Las celdas de combustible se han convertido en una tecnología prometedora para generar energía eléctrica con bajas o cero emisiones. A través del estudio y la investigación de las propiedades de sus componentes se busca mejorar la eficiencia y vida útil de la celda, para incrementar su rendimiento y reducir los costos de producción.

El uso de materiales alternativos, la optimización del diseño, así como la investigación y desarrollo en la distribución y arreglos adecuados del conjunto de celdas, son algunas áreas prioritarias de este campo de investigación para que en el futuro se obtengan mejores dispositivos.

Para saber más

Se invita a conocer el laboratorio de Nuevos Materiales Cerámicos Nanoestructurados (NUMACEN) del Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM; así como a leer los siguientes artículos y libros:

[1] Manzo, D., Thai, R., Le, H. T., & Venayagamoorthy, G. K. (2025). *Fuel cell technology review: Types,- economy, applications, and vehicle-to-grid scheme. Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *75*, 104229.

[2] Jamal, T., Shafiullah, G. M., Dawood, F., Kaur, A., Arif, M. T., Pugazhendhi, R., ... & Ahmed, S. F. (2023). *Fuelling the future: An in-depth review of recent trends, challenges and opportunities of hydrogen fuel cell for a sustainable hydrogen economy. Energy reports*, *10*, 2103-2127.

[3] Qasem, N. A., & Abdulrahman, G. A. (2024). *A recent comprehensive review of fuel cells: history, types, and applications. International Journal of Energy Research, 2024*(1), 7271748.

[4] Li, Y. (2025). *Fuel Cell Fundamentals and Applications*. Springer Nature.

[5] Sorensen, B., & Spazzafumo, G. (2018). *Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications*. Elsevier-Academic Press.

Control de temperatura de un electrolizador alcalino para la producción de HHO mediante la adaptación de un intercambiador de calor.

Arlett Adame Najera, Víctor Miguel Salinas Cortés, Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, Víctor Manuel Alvarado Martínez, Tomás Emmanuel Higareda Pliego.
Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.

Introducción

El gas oxihidrógeno (HHO) es la mezcla de H_2 y O_2 gaseoso en proporción 2:1, es obtenido mediante la electrólisis del agua. El HHO se considera una alternativa limpia y renovable como combustible. Entre las tecnologías utilizadas para su generación, los electrolizadores alcalinos destacan por ser ampliamente desarrollados y han sido aplicados en sectores como la industria metalúrgica y química, así como en sistemas recientes de **generación de hidrógeno verde** acoplados a fuentes renovables. En estos sistemas, la temperatura es una variable clave, ya que influye la producción y pureza del gas, en la vida útil del material y en el consumo de energía [3]. Generalmente, estos electrolizadores operan en un rango de 60 °C a 80 °C utilizando soluciones de hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) como electrolito, este intervalo de temperatura ha demostrado ser óptimo para mejorar la eficiencia del proceso de electrólisis y, en consecuencia, para la producción de HHO.

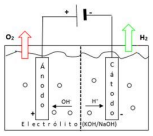


Figura 1. Electrólisis Alcalina.

Objetivo

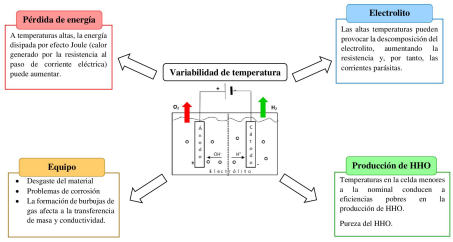
General

Analizar el impacto de la variabilidad de temperatura del electrolito en un electrolizador alcalino en la producción de oxihidrógeno.

Específicos

- Establecer un modelo matemático que describa el comportamiento de la temperatura del electrolito (KOH) en un intercambiador de calor.
- Simular el modelo obtenido para la estimación de la temperatura y compararlo con datos experimentales.
- Definir una ley de control adecuada para regular la temperatura del sistema con la finalidad de operarlo de manera regulada.
- Simular la ley de control para regular la temperatura del electrolito y compararlo con datos experimentales.
- Implementar el sistema de regulación de temperatura en un electrolizador alcalino.
- Desarrollar el análisis experimental del impacto de la variación de la temperatura del electrolito.

Problemática



Propuesta de solución

Para mejorar el desempeño del electrolizador en la producción de HHO, se integró un sistema térmico basado en un intercambiador de calor de placas paralelas para regular la temperatura del electrolito. Este intercambiador ha sido instrumentado con sensores de flujo y temperatura, lo que permitirá obtener los datos necesarios para desarrollar un modelo que describa el comportamiento térmico del sistema. Dicho modelo servirá como base para implementar una estrategia de control capaz de mantener un punto de operación de temperatura que garantice condiciones estables que favorezcan la eficiencia, la pureza del gas y la seguridad del proceso.

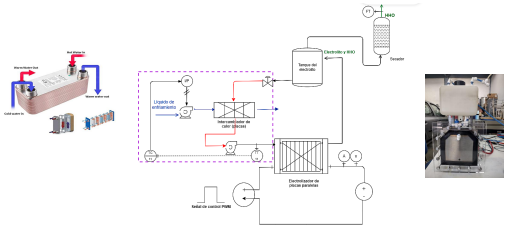
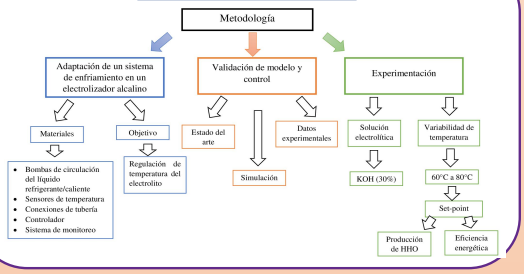


Figura 2. Diagrama de proceso de adaptación del intercambiador al sistema electrolítico

Metodología



Conclusión

- Controlar la temperatura del electrolizador es importante porque ayuda a que la producción de HHO sea más eficiente y segura.
- El modelo matemático nos permite entender cómo se calienta el sistema y cómo mantenerlo en condiciones adecuadas.
- La adaptación del intercambiador de calor permite enfriar el electrolito cuando es necesario y, junto con el control, mantener una temperatura estable en el sistema electrolítico.

Resultados

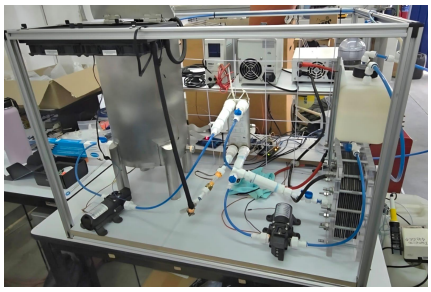


Figura 3. Sistema adaptado.

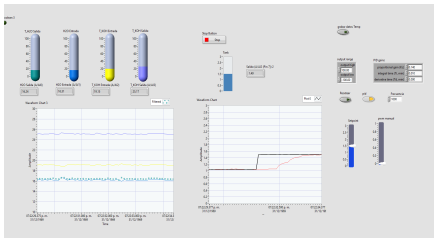


Figura 4. Interfaz de LabVIEW.

Referencias

[1] P. A. Goud and M. S. Baba, "Optimizing diesel engines with oxyhydrogen dual fuel: Enhancing performance with green methyl ester using MCDM techniques," *Heat Transfer*, vol. 54, no. 1, pp. 670–693, Sep. 2024, doi: 10.1002/htj.23190.

[2] P. Zhao, J. Wang, W. He, L. Sun, and Y. Li, "Alkaline zero gap bipolar water electrolyzer for hydrogen production with independent fluid path," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 352–360, May 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.05.135.

[3] G. Sakas, A. Ibáñez-Rioja, V. Ruuskanen, A. Kosonen, J. Ahola, and O. Bergmann, "Dynamic energy and mass balance model for an industrial alkaline water electrolyzer plant process," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 7, pp. 4328–4345, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.126.

[4] A. K. E. Soly, M. A. E. Kady, A. E. F. Farrag, and Gad, "Comparative experimental investigation of oxyhydrogen (HHO) production rate using dry and wet cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 24, pp. 12639–12653, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.110.

[5] E. D. R. Castrillo, J. R. B. Santaella, M. E. H. Assad, A. Khosravi, and J. J. G. Pabon, "Modeling and validation of a comercial dry electrolytic cell for the production of oxyhydrogen," *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, vol. 22, pp. 1–6, Feb. 2020, doi: 10.1109/aset48392.2020.9118280.

[6] V. M. Sanchez, C. A. Cedano, J. Posada, R. Barbosa, and F. I. Chan, "Diseño e Implementación de un Sistema de Control para un Electrolizador Alcalino," *IEEE ANDESCON*, pp. 1–6, Aug. 2018, doi: 10.1109/andescon.2018.8564687.

EL FUTURO DE LA ENERGÍA ALMACENADA: BATERÍAS DE FLUJO

Laura Elena Hernandez Pardiñas[1], Marisol Cervantes Bobadilla[1], Mario Román Díaz Guillén[2], Jarniel García Morales[1] , Manuel Adam Medina[1]
1. Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
2. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

La Evolución del Almacenamiento Energético

En el siglo XIX, Alessandro Volta inventó la primera pila, conocida como pila voltaica. Durante muchos años no hubo cambios, hasta que surgieron nuevas tecnologías, como las baterías de flujo.

¿Y por qué son tan importantes? Los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural han sido explotados y consumidos en grandes cantidades, provocando graves consecuencias en el medio ambiente.

La utilización de energías limpias y renovables como la energía solar, eólica y geotérmica se vuelven un punto clave para lograr un desarrollo sostenible. Sin embargo enfrentan un gran reto : la intermitencia.

Cuando el viento no sopla o se tiene niveles bajos de irradiancia, la producción de energía disminuye, surgiendo la necesidad de desarrollar sistemas eficientes de almacenamiento.

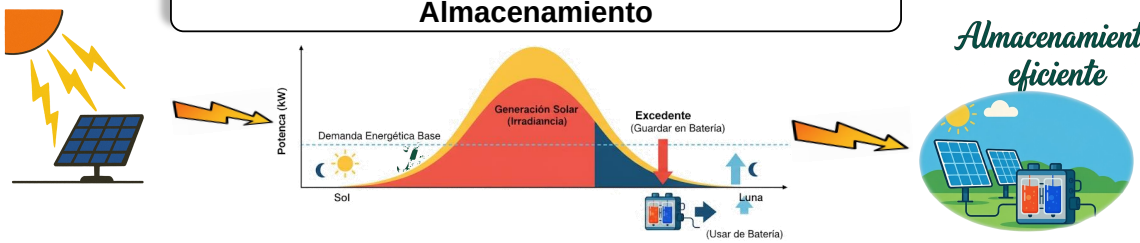
La Tecnología del Flujo Redox

Las baterías de flujo redox funcionan como pilas recargables; almacenan la energía en soluciones líquidas llamadas electrolitos, las cuales se encuentran en tanques separados. Durante el ciclo de carga y descarga , los electrolitos circulan hacia un reactor electroquímico , donde ocurre la reacción redox (reducción y oxidación), esta reacción convierte la energía química a eléctrica.

Los dos líquidos se mantienen separados por una membrana delgada, la cual permite el paso de ciertos iones.

Prototipo de batería de flujo redox

El Reto de la Intermitencia y la Solución del Almacenamiento



La intermitencia en las fuentes renovables causada por diversos aspectos altera la continuidad de producción energética. Para enfrentar este desafío las baterías de flujo redox representan una solución prometedora.

Tienen una gran capacidad de almacenar grandes cantidades de energía y liberarla cuando la producción disminuye. Soportan varios ciclos de carga y descarga y pueden conservar energía durante días o incluso semanas, y tienen una larga vida útil con bajo costo.

Hacia un control inteligente de baterías de flujo

El proyecto propone desarrollar un modelo basado en datos con el objetivo de estudiar el comportamiento de una batería de flujo redox.

Se evaluarán estrategias de control empleando redes neuronales artificiales y algoritmos de optimización, con el objetivo de operar el sistema en condiciones de máxima eficiencia considerando sus limitaciones físicas con el fin de contribuir a sistemas de almacenamiento más sostenibles.

¿Sabías que?

Una batería de flujo puede durar más de 20 años sin perder capacidad de almacenamiento

A diferencia de las baterías convencionales, los líquidos que almacenan la energía pueden reemplazarse fácilmente, lo que permite reciclar el sistema y reducir su impacto ambiental.

Además, su capacidad se puede aumentar simplemente agregando tanques más grandes, algo ideal para energías renovables a gran escala.

Conclusión

Las baterías de flujo redox son una tecnología emergente con gran potencial para integrarlas con las energías renovables gracias a su gran capacidad para guardar mucha energía.

Su bajo costo , larga vida útil y función de operación las vuelven ideales para sistemas de almacenamiento a gran escala.

El desarrollo continuo de su funcionamiento, junto con la investigación en materiales menos contaminantes son esenciales para consolidar estas baterías en la transición hacia un sistema energético sostenible.

Referencias "Para saber más"

- Barbón Núñez, A. (2018). Análisis de ventajas e inconvenientes de las baterías de flujo redox frente a las baterías de iones de litio en aplicaciones de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica (Trabajo Fin de Máster, Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, TFM18010097).
- Pan M, Shao M, Jin Z. Development of organic redox-active materials in aqueous flow batteries: current strategies and future perspectives. SmartMat. 2023; 4:e1198. doi:10.1002/smm2.1198
- Popa, I. O., Ibáñez Casao, Á., Pastor-Flores, P., & Barreras, F. (2022). Introducción a las baterías de flujo redox de vanadio (VBFR) y su monitorización. Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A, 10. https://doi.org/10.26754/jjii3a.20227010

Electrolito Sólido Base Ceria para Celdas de Combustible

Victor Manuel Rincon Fonseca*, Luis Antonio García Contreras*, Rafael Guillermo Suárez Nájera* y José Álvaro Chávez Carvayar*.
*Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

Introducción

Debido a las crecientes necesidades energéticas es importante desarrollar fuentes de energía más eficientes y sostenibles que eliminen el uso de hidrocarburos y minimicen su impacto ambiental.

El hidrógeno como vector energético en una celda de combustible de óxidos sólidos (CCOS) es una alternativa prometedora, de gran potencial, como fuente de energía amigable con el medio ambiente, ya que transforma directamente la energía química del H_2 en energía eléctrica, con alta eficiencia y como producto de la reacción se obtiene agua.

Figura 1. Ceria dopada con Sm.

Esquema de una CCOS

Una CCOS está formada básicamente de las siguientes partes:
- Electrolito sólido, cerámico denso que conduce vacancias de oxígeno.
- Cátodo, circula aire del cual reduce el oxígeno molecular.
- Ánodo, ingresa el combustible (hidrógeno), al cual oxida.

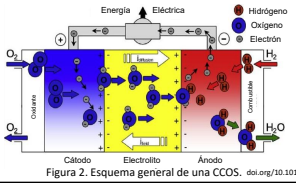
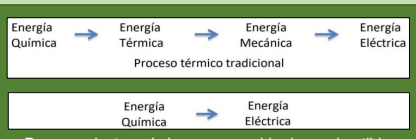


Figura 2. Esquema general de una CCOS. doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.015

Las celdas de combustible de óxidos sólidos:
- No producen emisiones contaminantes al utilizar hidrogeno como combustible.
- Altamente eficientes al convertir la energía química del H_2 en energía eléctrica.
- Ruido de operación mínimo.
- Mantenimientos reducidos.



Proceso electroquímico en una celda de combustible.

Características del material

Electrolito de óxidos sólidos $Ce_{0.80}Sm_{0.20}O_{2-\delta}$ (*SDC*)

Reacciones REDOX

- Ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Cátodo: $½\ O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
- Global: $H_2 + ½\ O_2 \rightarrow H_2O$

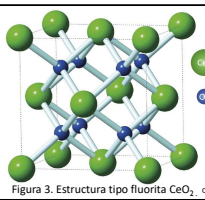


Figura 3. Estructura tipo fluorita CeO_2 doi.org/10.7566/JPSJ.87.041008

Estructura cristalina tipo Fluorita
FCC con sus sitios intersticiales tetraédricos totalmente ocupados

Efecto de dopantes en ceria

La ceria dopada con samario (*SDC*) es una cerámica sólida con gran conductividad iónica (figura 4), que supera a la circonia estabilizada con itria (*YSZ*) con 1.53 @ 850°C. Debido a vacancias de oxigeno que le genera el dopaje con elementos de valencia 3+, además de una temperatura de operación menor.

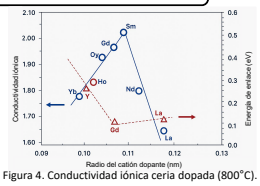


Figura 4. Conductividad iónica ceria dopada (800°C). doi.org/10.1039/d1ta07898d

Comparación de diferentes tipos de las celdas de combustible

Celda de combustible	Electrolito	Temperatura	Eficiencia	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Membrana de polímero	Nafión	70-110 °C	35-60%	Arranque rápido, poca corrosión debido al electrolito	Catalizadores caros, alta pureza de combustible	Vehículos, aplicaciones móviles
Alcalinas	NaOH, KOH	< 100 °C	60%	Alta eficiencia, bajo costo	Sensibles al CO_2 del aire	Vehículos espaciales, automóviles
Acido fosfórico	H_3PO_4	150-200 °C	40%	Tolerancia a diferentes combustibles	Catalizador de platino, largo tiempo de arranque	Transportación eléctrica
Carbonatos fundidos	K_2CO_3, Li_2CO_3	~ 650 °C	40-45%	Flexibilidad de combustibles	Corrosión de los componentes, largo tiempo de arranque	Generadores estacionarios
Óxidos Sólidos	*YSZ*, *SDC*	500-1000 °C	60%	Alta eficiencia, flexibilidad de combustibles	Corrosión de los componentes, largo tiempo de arranque	Generadores estacionarios

Tabla adaptada de doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.015

Aunque una CCOS funciona a altas temperaturas (800-1000°C), la reducción a temperaturas intermedias de operación (600-800°C) proporcionaría un arranque en menor tiempo, permitiría el uso de materiales más económicos y facilitaría los procesos de fabricación de los componentes.
El uso de *SDC* a temperaturas altas aumenta la conductividad iónica pero también lo hace la conductividad eléctrica, incrementando con ello el corto circuito de electrones que pasan a través del electrolito de la CCOS disminuyendo la eficiencia neta del dispositivo.
Los métodos de síntesis comúnmente utilizados para la síntesis de *SDC* son sol-gel, combustión, Pechini y coprecipitación.

Planta Generadora de CCOS

- Entró en operación en diciembre del 2018 (Italia).
- Potencia de 174 kW nominal.
- Eficiencia de 48-50% con picos de 56%.
- Biogás del tratamiento de aguas como combustible .

Figura 5. Planta generadora con 2 módulos de CCOS operando. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.022

Conclusiones

Es necesario el desarrollo de fuentes de energía más eficientes y sostenibles que reduzcan el uso de hidrocarburos y minimicen su impacto ambiental. Las CCOS representan una alternativa viable, pero su alta temperatura de operación incrementa los costos de fabricación y limita su aplicación.

Actualmente, la ceria dopada con samario como electrolito en una CCOS es un buen candidato por sus valores de conductividad iónica a temperatura intermedia. Su uso requiere encontrar electrodos que trabajen en sinergia con la *SDC*, en particular con la conductividad iónica y eléctrica, expansión térmica y temperatura de operación.

¿Quieres saber más?

- B.M.G. Melo. 2025, *Ionic conductivity and transport mechanism in Sm-doped CeO2 ceramics prepared from ionic gelation-derived oxide powders, Electrochimica Acta* 536, 146725.
- Dragan, M. 2024, *Solid Oxide Fuel and Electrolysis Cells Materials for a Net-Zero Economy. Materials*, 17, 6113.
- Nandini Jaiswal, 2019, *A brief review on ceria based solid electrolytes for solid oxide fuel cells, Journal of Alloys and Compounds* 781 984-1005.

Generadores de Alto Campo Magnético y Algunas Aplicaciones

José Guillermo Duarte León *, **, Rafael Guillermo Suárez Nájera, Jonathan Zamora Mendieta**, Luis Antonio García Contreras**, Marlene González Montiel***, José Álvaro Chávez Carvayar****

* Facultad de Ingeniería, UNAM. Circuito de exterior S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México.
** Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. Circuito de exterior S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México.
*** Centro de Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnologías Avanzada, IPN, Calzada Legaria 694. Col. Irrigacion, Miguel Hidalgo, C.P. 11500. Ciudad de México, CDMX.

Introducción

Los imanes permanentes almacenan energía en forma de un campo magnético sin necesidad de corriente eléctrica, gracias a la contribución total de la alineación de los momentos magnéticos de sus partículas atómicas, lo cual promueve diferentes propiedades magnéticas.

En contraste, los electroimanes producen campos magnéticos no permanentes, cuya intensidad depende de la corriente eléctrica que circula entorno a su núcleo (generalmente de hierro, por su carácter ferromagnético, que refuerza el flujo).

Al igual que la forma del campo eléctrico depende de la disposición de las cargas, la forma del campo magnético depende de la trayectoria de la corriente que circula en el electroimán, mientras que en los imanes permanentes el campo magnético depende de su geometría.

Funcionamiento

Las bobinas de Helmholtz permiten generar campos magnéticos intensos y homogéneos. Consisten en dos bobinas circulares idénticas, separadas por una distancia igual a su radio y alineadas sobre un mismo eje. Mediante la ley de Biot–Savart y el principio de superposición, se obtiene que el flujo magnético en el centro del eje es proporcional a la corriente suministrada, al número de vueltas y a la permeabilidad del medio e inversamente proporcional al radio de las bobinas.

$$|\vec{B}_{total}| = \frac{8}{5\sqrt{5}} \cdot \frac{\mu_m I N}{R}\ [T]$$

Por su parte, las matrices de Halbach utilizan configuraciones específicas de imanes permanentes (comúnmente hechas de aleaciones base NdFeB). Estas disposiciones, ya sean lineales o cilíndricas, concentran el campo magnético en una región y lo reducen en otra. Su estudio combina enfoques analíticos como el análisis de campo magnetostático, métodos numéricos, como el análisis por elementos finitos (FEA) o por elementos de contorno (BEM), para modelar con detalle geometrías complejas.

Generadores de campos magnéticos

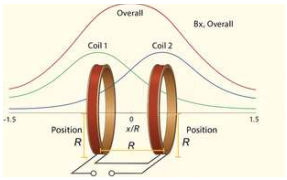


Figura 1. Visualización de la superposición del campo magnetico en bobinas de Helmholtz. [1]

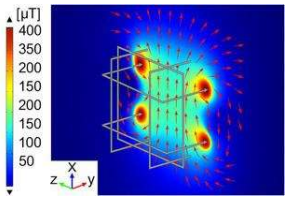


Figura 3. Simulación del campo magnético producido por un arreglo de tres bobinas de Helmholtz cuadradas. [3]

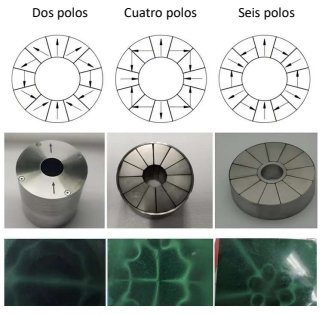


Figura 2. Esquema de orientación, foto y visualización del flujo por medio de un visor magnético de matrices de Halbach cilíndricas de dos, cuatro y seis polos, adaptadas de [2].

¿Sabías que...?

La palabra imán proviene del latín medieval *magnes* que, a su vez, se deriva del griego antiguo *μαγνῆτις λίθος* (*magnētis lithos*), que significa piedra de Magnesia.

Magnesia era una región de Tesalia (Grecia) famosa por sus depósitos de magnetita (Fe_3O_4), un mineral naturalmente magnetizado, cuyas propiedades de atraer pequeños trozos de hierro eran atribuidas a fuerzas sobrenaturales desconocidas.

Aplicaciones

Las bobinas de Helmholtz tienen amplias aplicaciones en la ciencia y la tecnología moderna. Se emplean en pruebas de interferencia electromagnética, en la caracterización de materiales magnéticos y sus propiedades, en estudios de física fundamental como experimentos de resonancia magnética nuclear (RMN) y la simulación de un entorno con campo magnético para pruebas funcionales, así como para la calibración de sistemas y sensores. En el ámbito médico, se han diseñado y fabricado para favorecer procesos de cicatrización y regeneración de tejidos blandos y duros.

Las matrices de Halbach se emplean en sistemas de levitación magnética por medio de la ley de Lenz, en motores y generadores eléctricos para aumentar la eficiencia energética y el par mecánico, en RMN e imagenología por resonancia magnética (IRM), para generar campos homogéneos con menor espacio, en refrigeración magnética intensificando el efecto magnetocalórico, en aceleradores de partículas, en rodamientos magnéticos, en el área biomédica para redirigir nanopartículas magnéticas con fármacos hacia tejidos específicos y en sistemas aeroespaciales donde se requieren imanes compactos y ligeros.

Conclusiones

Los generadores de alto campo magnético abordados aquí, enfrentan importantes retos técnicos y económicos, como el calentamiento de los conductores, los elevados costos de fabricación de imanes permanentes con el campo magnético adecuado, la complejidad en el diseño y la optimización de estas configuraciones. Sin embargo, superar estas limitaciones abriría un horizonte de aplicaciones potenciales: en el sector energético, donde contribuirían en el desarrollo de sistemas de conversión de energía más eficientes; en el campo médico-biológico facilitarían tratamientos innovadores como la hipertermia magnética contra el cáncer y técnicas avanzadas de IRM; mientras que en la industria impulsarían la creación de sistemas de levitación magnética.

Para saber más

[1] Ferdi AVCI *et al. Design, production and comparison with theoretical calculations of a uniform electromagnetic field generator with Helmholtz coils. Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*, vol.8, issue1, pp. 53-60, 2025. DOI: 10.54565/jphcfum.1671822
[2] Guías de imanes de matriz *Halbach*, newland magnetic co, 2025. https://www.newlandmag.com/es/guias-de-imanes-de-matriz-halbach/
[3] Restrepo, A. *et al. A simple geomagnetic field compensation system for uniform magnetic field applications.* Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, (83), pp. 65-71, 2017.
[4] Mortazavi Gh. *et al. Designed and fabrication of Helmholtz coils to study the effects of pulsed electromagnetic fields on the healing process in Periodontitis: preliminary animal results. Journal of Biomedical Physics & Engenieering.* 2014;4(3):83-88. PUBMED PMID: 25505775.
[5] Webb, A. *et al. Improving the field homogeneity of fixed- and variable-diameter discrete Halbach magnet arrays for MRI via optimization of the angular magnetization distribution. Journal of Magnetic Resonance* 324 (2021). DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmr.2021.106923
[6]. Jaewook Lee *et al. Topology optimization of Halbach magnet arrays using isoparametric projection. Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 432, pp. 140-153, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.092

HIDRÓGENO VERDE: LA ENERGÍA LIMPIA DEL FUTURO

Jesús Alberto Gaytán Máximo*, Cornelio Morales Morales*, Angel Daniel Sánchez Librado*
Jaime Navarrete Damián*, Nadia Susana Correa Martínez**
*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Querétaro, México.
**Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 145, San Juan del Río, Querétaro, México.

Introducción

El hidrógeno verde se perfila como una de las soluciones más prometedoras para combatir el cambio climático. Se trata de un combustible universal, ligero y muy reactivo que se obtiene sin generar emisiones de dióxido de carbono (CO_2). A diferencia de otros combustibles, al usar hidrógeno verde solo se libera vapor de agua, lo que lo convierte en una pieza clave para construir un futuro energético sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

"¿sabías que…?"

Imagina que tienes 1 kg de hidrógeno y 1 kg de gasolina. Con esa misma cantidad, el hidrógeno te proporciona 2.75 veces más energía. Esto significa que un coche podría recorrer una distancia mucho mayor con el mismo peso de combustible, lo que demuestra su increíble eficiencia energética (U.S. Department of Energy, 2025).

La grafica de densidad energética, muestra que el hidrógeno tiene la mayor densidad energética en comparación con combustibles como la gasolina, el diésel y el gas natural, lo que significa que produce más energía con menos masa, siendo una opción eficiente y limpia para el futuro.

Contenido principal

El hidrógeno verde se genera a través de un proceso llamado **electrólisis del agua**. Este método utiliza electricidad para separar la molécula de agua (H_2O) en sus dos componentes: oxígeno (O) e hidrógeno (H_2). Dado que el agua pura es un mal conductor de la electricidad, para que el proceso sea eficiente se le añade una sustancia llamada electrolito (generalmente hidróxido de potasio, KOH) que permite el paso de la corriente.

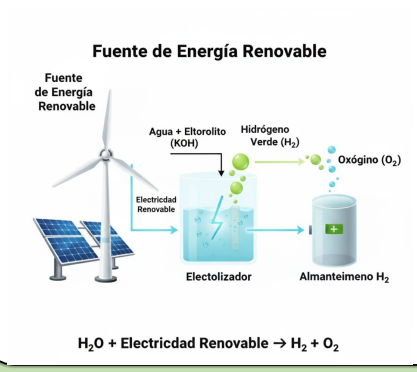
Para que el hidrógeno sea considerado "verde", la electricidad utilizada en este proceso debe provenir de **fuentes de energía renovables**, como la solar (paneles solares) o la eólica (aerogeneradores).

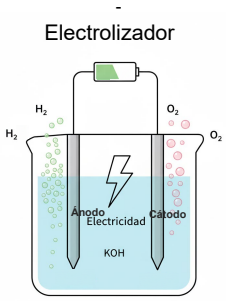
- **Agua (H_2O) + Electricidad Renovable → Hidrógeno (H_2) + Oxígeno (O)**

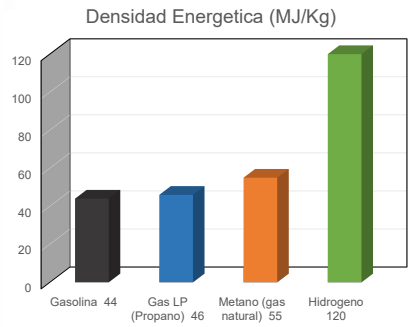
En otras palabras, la electricidad es quien se encarga de descomponer el agua para liberar el hidrógeno, un combustible potente y completamente limpio.

El electrolizador es quien se encarga de hacer este proceso, se compone de dos electrodos un ánodo(-) y un cátodo(+) a los cuales se les suministra electricidad para que pueda separar la molécula del agua.

Imágenes y gráficas







Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

El hidrógeno verde tiene el potencial de transformar nuestro entorno y nuestra forma de vida:

Transporte Limpio: Podría alimentar coches, autobuses, camiones, barcos e incluso aviones, eliminando la contaminación del aire en las ciudades.

Industria Sostenible: Puede reemplazar a los combustibles fósiles en industrias difíciles de descarbonizar, como la producción de acero, cemento y productos químicos.

Hogares sin Emisiones: En el futuro, podría utilizarse para la calefacción de edificios y la generación de electricidad doméstica.

Respaldo para las Renovables: Funciona como una "batería gigante" para almacenar la energía solar y eólica, garantizando un suministro eléctrico estable las 24 horas del día.

Conclusión o mensaje final

En conclusión, el hidrógeno verde se presenta como una pieza angular en el rompecabezas de la transición energética. Su capacidad para producirse sin emisiones, almacenar energía renovable y descarbonizar industrias críticas lo convierte en un aliado indispensable contra el cambio climático. Aunque los desafíos como el costo y la infraestructura requieren innovación y políticas de apoyo, el camino hacia una economía del hidrógeno ha comenzado. Adoptar esta tecnología es una inversión estratégica en la resiliencia de nuestro planeta y en la salud de las futuras generaciones.

Referencias "Para saber más"

•Agencia Internacional de la Energía. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. IEA. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021.

•IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction.

•U.S. Department of Energy. (2025). *Hydrogen fuel basics*. Alternative Fuels Data Center. Recuperado el 10 de octubre de 2025, de https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_basics.htm.

Hogar Inteligente, Energía Eficiente: Pequeños Cambios, Gran Impacto

M.I. Francisco Javier Becerra González*, Dr. José Gerardo Vera Dimas*, Dr. Luis Cisneros Villalobos*
*Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería/Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Introducción

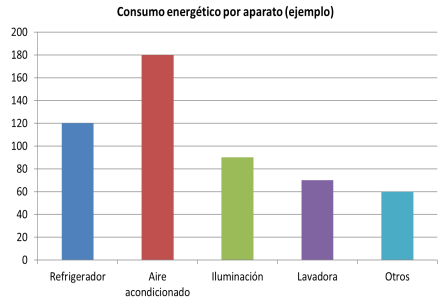
El consumo de energía eléctrica en los hogares crece cada año debido al uso de aparatos electrónicos, iluminación y sistemas de climatización. La eficiencia energética doméstica busca reducir este consumo sin sacrificar comodidad, mediante el uso racional de los recursos y tecnologías más limpias.

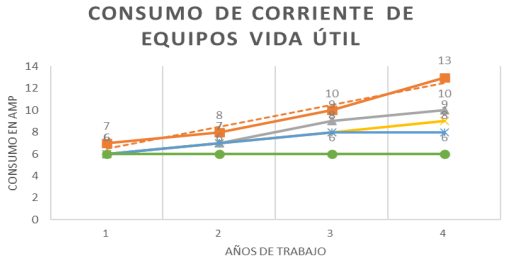
Contenido principal

1. Observación del consumo eléctrico promedio en viviendas urbanas.
2. Identificación de aparatos de alto consumo.
3. Evaluación de alternativas más eficientes.
4. Cálculo de ahorro estimado por hogar al aplicar medidas.

Objetivo: Promover prácticas simples y accesibles que mejoren la eficiencia energética en el hogar.

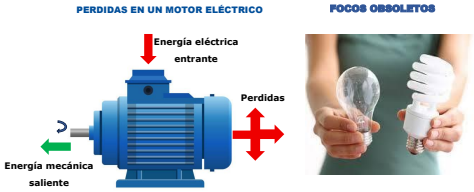
Comportamiento del Consumo de energía



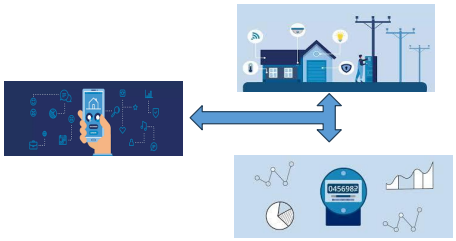


"¿sabías que...?"

El consumo de energía aumenta con equipos ineficientes



Puedes controlar el encendido y el apagado de tus lámparas y equipos cuando los requieres desde tu teléfono y así ahorrar energía y monitorear tu consumo.



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

- ✓ Sustituir focos incandescentes por LED reduce el consumo de iluminación en hasta 80%.
- ✓ Desconectar aparatos en modo de espera puede ahorrar 5 a 10% de la energía mensual.
- ✓ Los hogares con electrodomésticos eficientes pueden disminuir su gasto anual en más de $2,000 MXN.
- ✓ Utilizar alguna aplicación para el control de encendido/apagado reduce hasta en un 15% de consumo bimestral.

Conclusión o mensaje final

La eficiencia energética en el hogar no solo depende de la tecnología, sino también de la conciencia y participación de las personas. El uso de tecnologías inteligentes, como sensores, aplicaciones móviles e Internet de las Cosas (IoT), facilita la gestión del consumo eléctrico y permite adoptar hábitos más sostenibles sin perder confort. Pequeñas acciones — como apagar luces innecesarias, usar focos LED o programar aparatos— generan grandes beneficios ambientales y económicos. Cada hogar puede convertirse en un espacio inteligente y responsable, capaz de reducir su huella energética y contribuir al cuidado del planeta.

Referencias "Para saber más"

1. Prieto González, L.; Fensel, A.; Gómez Berbís, J. M.; Popa, A.; de Amescua Seco, A. (2021). *A Survey on Energy Efficiency in Smart Homes and Smart Grids.* Energies, 14(21), 7273. DOI:10.3390/en14217273.
2. McIlvennie, C.; Sanguinetti, A.; Pritoni, M. (2020). Of impacts, agents, and functions: An interdisciplinary meta-review of smart home energy management systems research. Energy Research & Social Science. DOI:10.1016/j.erss.2020.101555.
3. Patience, C. Ukpene & Tessy N. Apaobueze. (2024). The Impact of Smart Home Technologies on Energy Efficiency, Cost Savings, and Environmental Benefits. Journal of Energy Engineering and Thermodynamics, 4(04), 21-32. DOI:10.55529/jeet.44.21.32.
4. Qayyum, F.; Jamil, H.; Ali, F. (2024). A Review of Smart Energy Management in Residential Buildings for Smart Cities. Energies, 17(1), 83. DOI:10.3390/en17010083. M
5. Hartoyo, Sa'adilah Rosyadi, Usman Nursusanto, Khairunnisa, Septian Rahman Hakim & Arya Sony. (2024). Integrating Solar Power System and Smart Home: Energy Efficiency and Sustainability Increase – A Review Article. Journal of Vocational Applied Research and Studies, 1(2), 104-112.

Introducción Al Diseño De Un Disipador De Calor Para Un Transistor

Gerardo Gómez Gómez*, Saúl de Jesús Molina Domínguez*, Gustavo Miguel Tovar López*, Julio César Llaven Gordillo*, Marco Antonio Zúñiga Reyes*
* Tecnológico Nacional de México/IT de Tuxtla Gutiérrez. Departamento de Metal-Mecánica.

Introducción

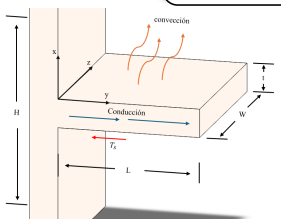
Los dispositivos electrónicos son componentes que funcionan con energía eléctrica, y parte de esta se convierte en calor. Si el calor generado no se disipa correctamente, la temperatura de la unión interna del componente puede elevarse hasta niveles que comprometen el funcionamiento del dispositivo y acortan su vida útil. Los disipadores de calor son elementos diseñados para extraer el calor generado del componente, manteniéndolo dentro de límites seguros de temperatura. La eficiencia de un disipador de calor depende de varios factores: material, superficie, resistencia térmica y geometría, entre otros. Por lo tanto, elegir o diseñar el disipador de calor correcto es esencial para la fiabilidad, la eficiencia y la vida útil del componente electrónico.

Contenido principal

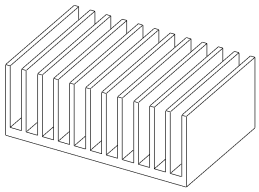
Para diseñar un disipador de calor es necesario determinar la cantidad de potencia a disipar (en Watt), la temperatura máxima permitida (°C o K), y las condiciones ambientales. Además, se deben establecer los límites físicos (espacio disponible, peso), el costo, la manufactura, el tipo de montaje, la estética, entre otros.

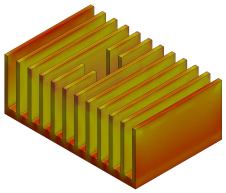
Se debe tomar en cuenta la sumatoria de resistencias: de la unión del dispositivo al disipador ($R_{\theta cs}$), del disipador al ambiente ($R_{\theta sa}$) ambas medidas en °C/W o K/W. Una menor resistencia significa menor aumento de temperatura para una potencia dada. La conducción es la transferencia de calor a través del contacto directo entre partículas; la convección es la transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido (líquido o gas); por último, la radiación ocurre a través de ondas electromagnéticas, como la luz infrarroja.

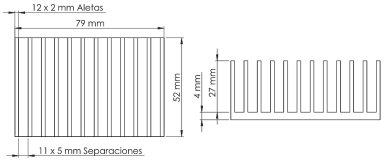
Imágenes y gráficas



a)


b)


c)



d)

El disipador térmico está diseñado para optimizar la transferencia de calor mediante convección natural, sin requerir ventiladores ni otros procedimientos de refrigeración obligatorios. Dispone de una base firme que distribuye el calor del componente electrónico a un conjunto de 12 aletas, con un espesor de 2 mm y una altura de 27 mm. Las aletas incrementan considerablemente la superficie de contacto con el aire, permitiendo que el calor se disipe de forma eficiente a través del movimiento natural del aire entre las separaciones de 5 mm.

e)

Figura 1. a) Análisis teórico, b) Diseño recursivo, c) Simulación, d) Dimensiones del disipador obtenidas despues del análisis, e) Impresión 3D para pruebas. Imágenes de autoría propia.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Cuando se hace uso de dispositivos electrónicos (como teléfonos móviles, computadoras, lámparas LED), parte de la energía eléctrica se transforma en calor, si este calor no se canaliza, los componentes pueden llegar a temperaturas elevadas que disminuyen su eficiencia o incluso pueden llegar a dañarlos. Por este motivo, todos los componentes electrónicos de potencia modernos emplean un disipador térmico. En la vida cotidiana se suelen emplear disipadores hechos de aluminio o de cobre, debido a que estos materiales conducen el calor de manera eficiente.

Conclusión o mensaje final

Detrás de cada dispositivo electrónico de potencia se encuentra la aplicación de la termodinámica, la cual puede pasar desapercibida. Diseñar un disipador no solo es un ejercicio técnico, sino una contribución directa a la vida cotidiana: garantiza la seguridad de un cargador, la potencia de una computadora, la duración de un auto eléctrico y la sostenibilidad de los equipos del futuro. Un disipador desarrollado desde cero no solo es cuestión de ecuaciones o metales, sino de entender cómo fluye la energía, cómo mantener el equilibrio entre potencia y estabilidad, el cual es un objetivo fundamental.

Referencias "Para saber más"

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (3.ª ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentos de transferencia de calor (6.ª ed.). México: Pearson Educación.
Braga, N. (s.f.). INCB. Obtenido de Disipadores de Calor – Cómo funcionan (ART1036S): https://incb.com.mx/index.php/articulos/53-como-funcionan/20360-disipadores-de-calor-como-funcionan-art1036s

MICRORREDES VERDES

M.C. Zuleyma Lorena España Ruiz*, Dra. Mónica Borunda Pacheco*, Dra. Ma. Guadalupe López López*
*Departamento de Ingeniería Electrónica (Área: ERyEE) – Tecnológico Nacional de México / CENIDET

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de *microrredes* se orienta hacia la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles mediante la integración de fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento energético, con el objetivo de garantizar la confiabilidad del suministro eléctrico y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, las *microrredes verdes* emergen como una solución tecnológica innovadora frente a los desafíos energéticos contemporáneos, al combinar fuentes renovables tales como solar, eólica y de biocombustibles con sistemas de almacenamiento y estrategias avanzadas de control inteligente, lo que permite un suministro eléctrico eficiente, resiliente y con una significativa reducción de la huella de carbono, representando un paso decisivo hacia la transición energética y el desarrollo de sistemas eléctricos más sostenibles y autónomos [1].

APLICACIONES

Fig. 1. Aplicaciones de microrredes limpias.

CONFIGURACION DE UNA MICRORRED VERDE

Tabla 1. Escala de potencia que opera una microrred.

Escala de Potencia	Rango Típico	Aplicación Común
Baja	De 1 kW a 100 kW	Aldeas o comunidades muy remotas, grupos de casas, o pequeñas instalaciones de telecomunicaciones.
Media	De 100 kW a 1 MW	Campus universitarios, hospitales pequeños, polígonos industriales o complejos residenciales.
Alta (Límite)	Hasta 10 MW (o, a veces, más)	Grandes bases militares, centros de datos, grandes campus o ciudades pequeñas.

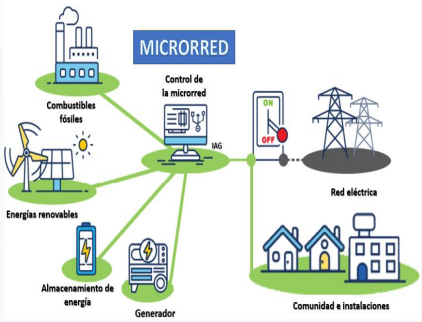


Fig. 2. Tipo de generación que conforman una microrred [2].

Fig. 3. Tipos de microrredes [3].

ESTRATEGIA DE ADMINISTRACIÓN DE ENERGÍA

La estrategia de administración de una microrred consiste *en planificar, controlar y optimizar el uso de la energía* para lograr un sistema eficiente, confiable y sostenible. Se basa en el monitoreo en tiempo real, la predicción de demanda y generación, y la gestión inteligente de recursos mediante sistemas EMS y control jerárquico. Con el apoyo de tecnologías como la IA y el IoT, se coordinan fuentes renovables, almacenamiento y cargas, permitiendo operar tanto conectada a la red como de forma autónoma, garantizando así la estabilidad y el aprovechamiento máximo de la energía limpia. En la figura 4, se visualiza el crecimiento de diferentes estrategias de administración de energía a lo largo de los años.

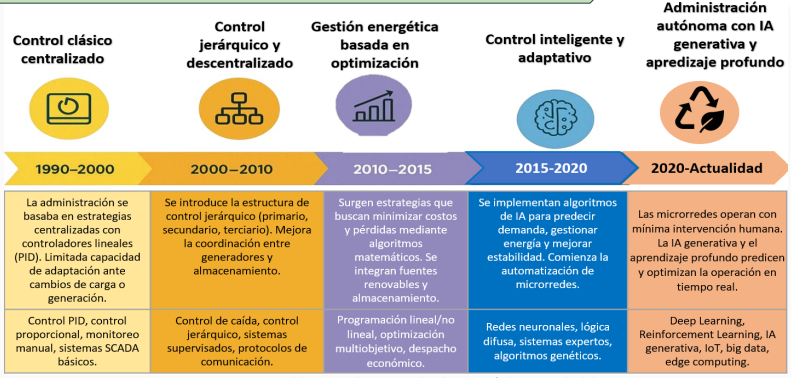


Fig. 4. Cronograma del avance en la estrategia de administración de microrredes [4].

RETOS

Las *microrredes verdes*, al integrar fuentes renovables y sistemas de almacenamiento, presentan desafíos críticos en diseño, operación y control que deben abordarse para garantizar su eficiencia y sostenibilidad. Algunos de esos retos se muestran en la fig. 5.

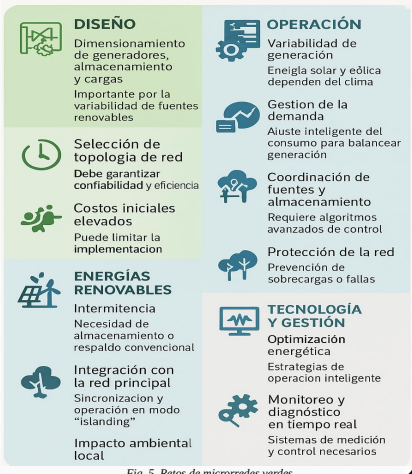


Fig. 5. Retos de microrredes verdes.

CONCLUSIÓN

Las microrredes verdes son un paso clave hacia un futuro energético más limpio y sostenible. Al combinar energías renovables, almacenamiento y control inteligente, permiten aprovechar mejor los recursos y garantizar un suministro confiable. Aunque aún enfrentan retos técnicos y operativos, la incorporación de la inteligencia artificial está transformando su administración, haciendo posible una gestión más eficiente, autónoma y amigable con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Arévalo, P., Ochoa-Correa, D., & Villa-Ávila, E. (2024). Optimizing microgrid operation: Integration of emerging technologies and artificial intelligence for energy efficiency. Electronics, 13(18), 3754.

[2] Guo, K., Eckhert, N., Chhajer, K., Abeykoon, L., & Schell, L. (2025). AutoGrid AI: Deep Reinforcement Learning Framework for Autonomous Microgrid Management. arXiv preprint arXiv:2509.03666.

[3] Hoummadi, M. A., Bossoufi, B., Karim, M., Althobaiti, A., Alghamdi, T. A., & Alenezi, M. (2025). Advanced AI approaches for the modeling and optimization of microgrid energy systems. Scientific Reports, 15(1), 12599.

[4] IEEE Standards Association. (2021). *IEEE Std 2030.7™-2017 - Standard for the Specification of Microgrid Controllers*. IEEE.

Refrigeración magnética de estado sólido

Rafael Guillermo Suárez Nájera*, Armando Reyes Montero*,Luis Antonio García Contreras*, Marlene Gonzalez Montiel, Edilso Reguera Ruiz**, José Álvaro Chávez Carvayar***

* Instituto de Investigaciones en Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de exterior S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México

** Centro de Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnologías Avanzada ,Instituto Politécnico Nacional, Calzada Legaria 694, Col. Irrigación, Miguel Hidalgo, C.P. 11500. Ciudad de México, CDMX

Introducción

Las tecnologías de control de temperatura funcionan a partir de la generación de variaciones térmicas en los materiales de trabajo. La tecnología comercial actual, conocida como **compresión de vapor**, modifica la presión y la fase del fluido de trabajo para producir estos cambios de temperatura. En contraste, la **refrigeración magnética** ajusta el campo magnético aplicado y el orden de fase magnética, logrando así alteraciones de la temperatura en un material sólido.

La principal ventaja de la tecnología de refrigeración magnética frente a la refrigeración convencional radica en una **mayor eficiencia energética**, que se estima en casi el doble de la alcanzada por la tecnología actual.

Retos tecnológicos

La refrigeración magnética enfrenta aún ciertos retos tecnológicos, entre los que destacan:

Materiales magnéticos: Deben presentar un fenómeno magnetocalórico óptimo y a temperatura ambiente. Los compuestos están basados en tierras raras (La, Gd, Nd, etc.) o en metales de transición (Ni, Mn, Fe, etc.).

Campo magnético: Se requieren campos magnéticos superiores a los convencionales, del orden de 1 a 3 T. Estos pueden obtenerse mediante el uso de electroimanes (como las bobinas de Helmholtz) o mediante arreglos de imanes permanentes (como las matrices de Halbach).

Diseño del dispositivo: Se trabaja en distintas configuraciones con el fin de optimizar el proceso, lo que ha dado lugar a propuestas tanto lineales como rotatorias.

¿Sabías que…?

Fig. 1. Fisico Emil Warburg (CC0, fuente Wikipedia).

Fig. 2. Artículo *Le phénomène magnétocalorique* de A. Piccard y P. Weiss. [4]

El fenómeno en el cual se basa la refrigeración magnética de estado sólido es el efecto magnetocalórico (MCE), el cual corresponde a un aumento de la temperatura de los materiales magnéticos al encontrarse dentro de un campo magnético.

Este fenómeno fue registrado por primera vez en 1881 por Emil Warburg al estudiar alambres de acero dentro de campos magnéticos.

Fue en 1917, cuando fue nombrado por los físicos August Piccard y Pierre Weiss como ***Le phénomène magnétocalorique*** o efecto magnetocalórico en español. En el artículo mostraron un estudio de la magnetización del níquel empleando un campo de 1.4 T y logrando una variación de temperatura de 1.5 °C.

Refrigeración magnética

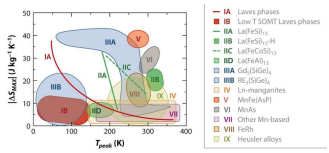


Fig. 3. Relación de |ΔSmax| y Temperatura pico (Tpeak) de diversas familias de materiales magnetocalóricos [2].

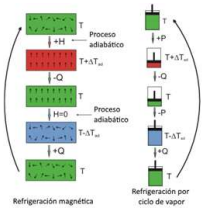


Fig. 4. Esquema del principio de funcionamiento del ciclo de compresión de vapor y la refrigeración magnética (CC0, fuente Wikipedia).

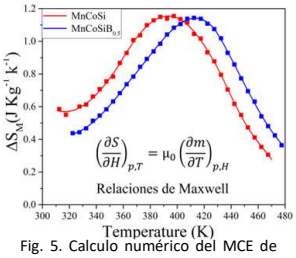


Fig. 5. Calculo numérico del MCE de las aleaciones metálicas MnCoSi y $MnCoSiB_{0.5}$ [3].

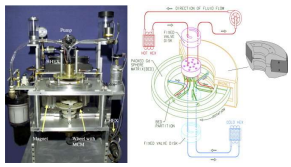


Fig. 6. Fotografía y esquema conceptual del primer prototipo de refrigerador magnético rotatorio del mundo [5].

¿Cómo impacta en la vida cotidiana ?

Los refrigeradores son aparatos que permanecen siempre conectados en nuestros hogares, por lo que consumen energía eléctrica de manera constante, convirtiéndolos en uno de los electrodomésticos que más energía utilizan. Se estima que, únicamente en México, estos aparatos representan entre el 25 % y el 30 % del consumo eléctrico de un hogar.

De acuerdo con el INEGI, existen aproximadamente 28.9 millones de refrigeradores en el país, con un consumo eléctrico promedio que oscila entre 200 y 500 Wh. Si los refrigeradores actuales fueran reemplazados por refrigeradores magnéticos de estado sólido, el consumo de energía podría reducirse a la mitad, lo que disminuiría la demanda en la red eléctrica nacional y, además, el monto a pagar en el recibo del servicio eléctrico.

Imagina el ahorro energético al considerar también el consumo de sistemas de aire acondicionado domésticos y del sector industrial, que representan una parte importante del gasto energético total.

Conclusiones

En la búsqueda de un consumo energético más eficiente, la refrigeración magnética se presenta como una de las alternativas más viables, ya que promete una mayor eficiencia en comparación con la tecnología actualmente aplicada. No obstante, esta tecnología requiere de investigaciones adicionales para superar las brechas tecnológicas existentes.

Por ello, las instancias que invierten en investigación constituyen un pilar fundamental para el desarrollo tecnológico. En este contexto, Rafael G. Suárez (CVU 557326) y colaboradores agradecen el apoyo brindado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Para saber más

Los invitamos a visitar al grupo de trabajo en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM (IIM-UNAM), en el Laboratorio de Nuevos Materiales Cerámicos Nanoestructurados (NUMACEN) LB-004. También se les sugiere consultar las referencias:

[1] Smith A. *Who discovered the magnetocaloric effect ? The European Psysical Journal H* 2013;517:507–17. https://doi.org/10.1140/epjh/e2013-40001-9.
[2] Franco V, Blázquez JS, Ingale B, Conde A. *The Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration Near Room Temperature: Materials and Models. Annu Rev Mater Res* 2012;42:305–42. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-100356.
[3] Rowe A. *Configuration and performance analysis of magnetic refrigerators. International Journal of Refrigeration* 2011;34:168–77. https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2010.08.014.
[4] Weiss P, Piccard A. *Le phénomène magnétocalorique. Journal de Physique Théorique et Appliquée* 1917;7:103–9. https://doi.org/10.1051/jphystap:019170070010300.
[5] Yu B, Liu M, Egolf PW, Kitanovski A. *A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. International Journal of Refrigeration* 2010;33:1029–60. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.04.002.
[6] Suarez Rafael G, Camacho-Peralta MA, Zamora J. Refrigeración magnética: Prospecto a futuro, Zacatepec, Morelos: CITID; 2023, p. 375–82.

CONTROL LÍDER-SEGUIDOR PARA FORMACIONES DE ROBOTS MÓVILES CON RUEDAS

Emiliano Peña Chang *, Arturo Daniel Espinosa Pedroza *, Guillermo Valencia Palomo **, Manuel Adam Medina *
* Centro Nacional de Investigación y desarrollo tecnológico (CENIDET) ** Instituto Tecnológico de Hermosillo (ITH)

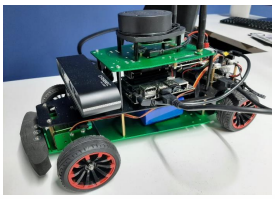
Introducción

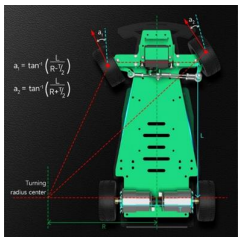
El avance en **automatización industrial** ha permitido que los sistemas **multi-robot** terrestres cobren protagonismo como potenciales herramientas de transporte, exploración y logística robótica; los modelos de robots con ruedas presentan complicaciones inherentes a sus restricciones no **holonómicas** (imposibilidad de movimiento lateral) junto a la necesidad de desplazarse en entornos con obstáculos.
En este contexto, los actuales esquemas de tipo **líder-seguidor** no tienen en cuenta tales restricciones, lo que deviene en errores de seguimiento para trayectorias complejas o pérdida de coordinación debido a fallos al escalar a tres robots. Este contexto motivó la búsqueda de alternativas en el control de estos sistemas **multi-robot** terrestres con el objeto de hacer frente a la coordinación local.

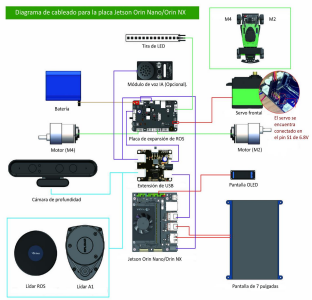
Contenido principal

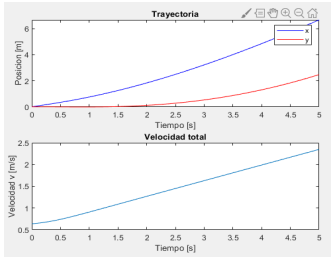
En la forma de coordinar robots **multi-agente**, existen estrategias de control de formaciones, que se llevan a cabo por medio de comunicación WIFI. Además, otra estrategia que se implementará será por medio de una formación. En la parte del la **comunicación** se debe considerar a un robot que lidera, y los demás robots que sigan al líder. Sin embargo, para el **control de formaciones de robots** hay que considerar el **modelo matemático** (representación matemática del comportamiento) del robot con movimiento similar a un automóvil en un plano x e y. Estas estrategias están relacionadas con programación en **ROS (Robot Operating System)**, que ayuda a manipular con equipos de robótica avanzados y de los equipos que compone el robot.

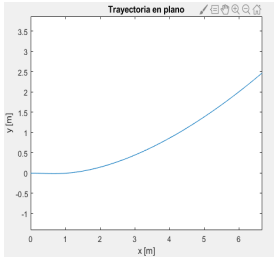
Imágenes y gráficas











Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Las formaciones de robots tienden aplicarse en lugares empresariales como en la vida diaria, uno de los más importantes sería que habría más comunicación por medio de los vehículos actuales por las calles, ya sea para transformar el tráfico en tráfico inteligente, mayor seguridad para los conductores y peatones, estrategias de rescate o vigilancia, etc. Mientras en la parte empresarial, los robots tendrían organización en realizar operaciones juntas, ya sea para distribución y entrega de paquetes, limpieza, agricultura, etc.

Conclusión o mensaje final

Las estrategias de control líder y seguidor se demuestra que es una investigación reciente que se puede aportar en la vida cotidiana, como también en la parte ambiental, disminución de tráfico que aporta significativamente un menor consumo de gasolina, también del tiempo de viaje y contaminación ambiental.
Por otro lado, muestra un buen desempeño en la estabilidad operativa, vigilancia, equipos de rescate y emergencias en hospitales.

Referencias "Para saber más"

Zhuang, H., Dong, K., Wang, N., & Dong, L. (2022). Multi-robot leader grouping consistent formation control method research with low convergence time based on nonholonomic constraints. Applied Sciences, 12(5), 2300.
Van Haastregt, J., Welle, M. C., Zhang, Y., & Kragic, D. (2024, November). Puppeteer your robot: Augmented reality leader-follower teleoperation. In 2024 IEEE-RAS 23rd International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (pp. 1019-1026). IEEE
Mansoor, M. I., & Kadri, M. B. (2021, January). Evaluating different Kinematic Models of Mobile robots using Linear and Non-linear controls. In 2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST) (pp. 560-567). IEEE.

CONVERSIÓN DE BICICLETA CONVENCIONAL A ELÉCTRICA CON ENERGÍAS RENOVABLES

Santiago Villa Castelan, Jareth Jazmín Javier Calixto, Mariela Pérez García, Abisaid Espinoza Romero, Donaciano Flores Gaspar
Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio

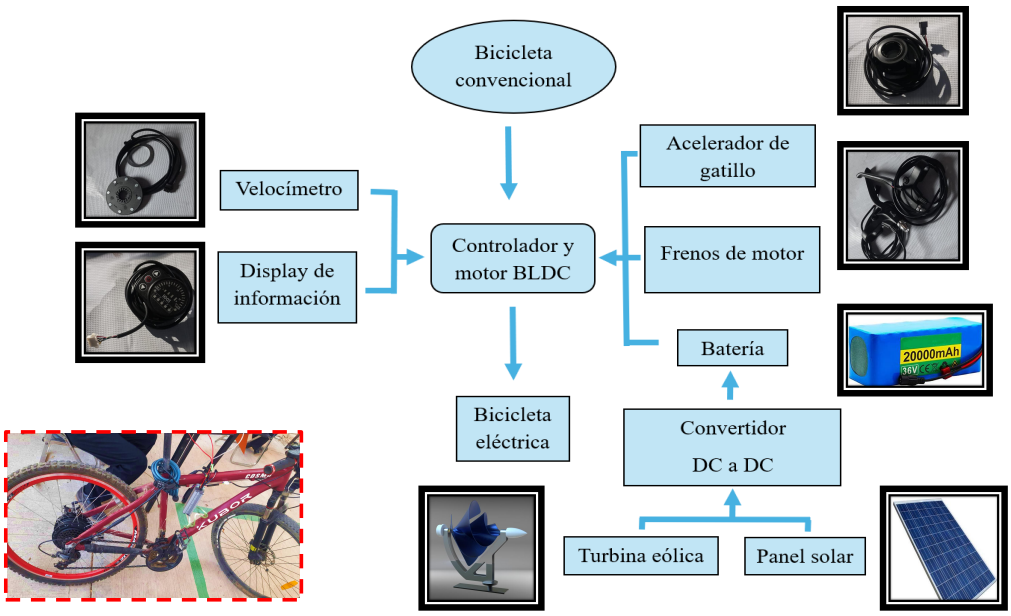
INTRODUCCIÓN

El desarrollo de vehículos eléctricos de baja potencia se ha convertido en una alternativa clave para la movilidad urbana sostenible. Este proyecto se enfoca específicamente en la implementación de bicicletas eléctricas como solución viable para reducir emisiones contaminantes y mejorar la accesibilidad al transporte en zonas urbanas y rurales.
La investigación se desarrolló en Acatlán de Osorio, Puebla, donde se evalúo la conversión de una bicicleta convencional a una bicicleta eléctrica, también se contempla la incorporación de una turbina eólica y paneles solares como fuentes de carga para la bicicleta.

CONTENIDO PRINCIPAL

El análisis y documentación para el armado de una bicicleta convencional a una bicicleta eléctrica es una etapa importante en el desarrollo de un medio de transporte eléctrico, el cual intenta sustituir el uso de vehículos de combustión interna, para así lograr una mejor movilidad urbana sustentable. Esto también abre camino a poder realizar diferentes análisis como lo son el consumo y eficiencia de la energía, autonomía, gestión de energía, fuentes de energía renovables, estaciones de carga portátiles, entre otros. En general los vehículos eléctricos representan una opción eficiente en términos energéticos, con costos operativos bajos, beneficios en la congestión vehicular y menos emisiones de gases dañinos.

Imágenes y gráficas



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Las bicicletas eléctricas representan una alternativa prometedora para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el transporte de pasajeros, así como el trafico vehicular en zonas urbanas y que no requieren trayectos muy largos a altas velocidades, las cuales no pueden ser brindadas por una bicicleta eléctrica. Una bicicleta eléctrica para uso urbano ronda los 500W de potencia, alcanzando velocidades de 35 a 45 km/h, además la implementación de una turbina eólica como método de recarga, logra recuperar energía eléctrica durante el trayecto recorrido, también la implementación de un panel solar en áreas clave para recargar la bicicleta eléctrica sin ningún costo.

Conclusión o mensaje final

Los beneficios del uso de bicicletas convencionales convertidas a eléctricas y recargándose con energías renovables, como energía solar y eólica, puede contribuir a la disminución del cambio climático, congestión vehicular, mayor rapidez en trayectos cortos. Así mismo ayuda a la salud de la población, manteniendo un buen ritmo cardiovascular y la mejora en la capacidad de respiración pulmonar.

Referencias "Para saber más"

P. Navarro, J. Rui-Wamba, y A. F. Camps, “La ingeniería de la bicicleta”.
A. Fayek, S. Md. Salimullah, Md. S. H. Shakib, A. I. Anik, y M. H. Khan, “Wind and Solar Powered Bicycle: Lessening the Dependency over Grid Electricity”, en 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh: IEEE, sep. 2019, pp. 448–451. doi: 10.1109/ICAEE48663.2019.8975494.

"SISTEMA DE ESTIMACIÓN DE POSICIÓN PARA UN ROBOT".

Robin Azael Peralta Silva, Bryan Bravo Peña, José Eduardo Vásquez Bautista,
Ing. Osmar García Zanabria, Ing. Yasmin Sarabia Sánchez.
Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio.

Introducción.

En la actualidad, los robots móviles desempeñan un papel importante en tareas como exploración, transporte y automatización industrial, por mencionar algunas. Uno de los mayores retos en este campo es lograr que el robot conozca su ubicación con exactitud para desplazarse sin intervención humana.

En este proyecto se propone un sistema de estimación de posición implementado en un robot con forma de carro de cuatro ruedas, donde cada motor proporciona información sobre el movimiento del robot [2]. Mediante el procesamiento de datos provenientes de sensores como los ultrasónicos, acelerómetros y giroscopios, el sistema calcula la posición y orientación del robot en tiempo real, mejorando su capacidad de navegación autónoma.

Contenido principal.

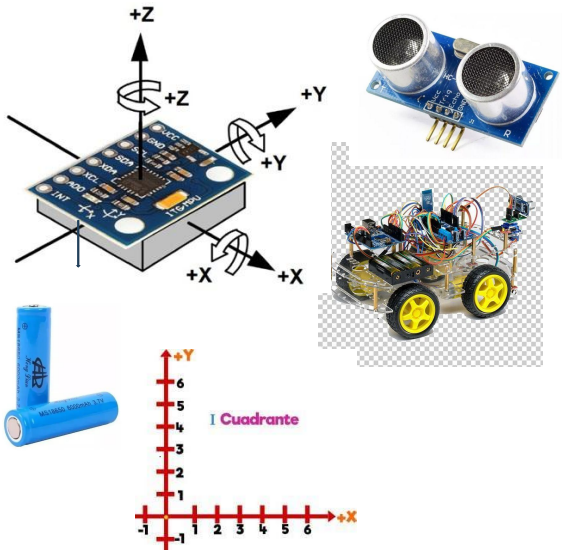
El sistema de estimación de posición desarrollado se implementó en un robot móvil con forma de carro, el cual está equipado con cuatro ruedas motrices, cada una controlada por su propio motor.

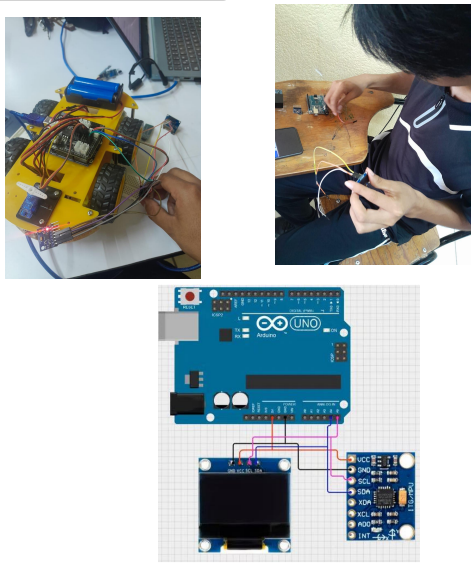
Este diseño permite una mejor tracción y maniobrabilidad al desplazarse en distintas superficies.

El objetivo principal del sistema es determinar la posición y orientación del robot dentro de un entorno, utilizando datos de diversos sensores [1]. Entre ellos se incluyen, acelerómetro y giroscopio los cuales son fundamentales para detectar cambios en la orientación y velocidad angular.

Este proceso permite obtener una estimación precisa de la posición del robot, es decir, su posición en los ejes X e Y, y su ángulo de orientación en tiempo real [4].

Imágenes de materiales utilizados y del ensamblado del robot.





Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno.

-Robots de entrega en interiores (paquetería, hospitales, oficinas).
-Vehículos autónomos (autos, drones, carritos móviles).
-Agricultura de precisión (robots recolectores).
-Exploración en entornos donde no hay GPS (minas, almacenes, espacios cerrados).
-Para enseñar conceptos de sensores, control y fusión de datos a estudiantes de robótica o ingeniería.
-En entornos industriales, los robots que estiman su posición con precisión pueden transportar materiales o inspeccionar zonas sin necesidad de infraestructura costosa.

Sección "¿sabías que…?"

Inspiración biológica: Algunos algoritmos de localización imitan cómo los humanos y animales usan referencias visuales o del entorno para orientarse.

El proyecto no solo permite comprender el funcionamiento de la localización en un robot a pequeña escala, sino también entender cómo los mismos principios tecnológicos se aplican en sistemas complejos de gran impacto en la vida cotidiana.

Los robots se "pierden" igual que las personas: Si un sensor falla, el robot puede perder la noción de su ubicación, como cuando nosotros nos desorientamos sin puntos de referencia.

Conclusión o mensaje final:

El desarrollo de un sistema de estimación de posición para un robot, basado en Arduino UNO y sensores como ultrasonido, giroscopio y acelerómetro, demuestra que incluso con recursos limitados es posible aplicar los mismos principios que mueven la robótica avanzada en autos autónomos, drones y dispositivos inteligentes [3].

En un mundo cada vez más automatizado, comprender y dominar estas técnicas no solo capacita al robot para "no perderse", sino que prepara a quienes desarrollan estos sistemas para enfrentar los desafíos de la innovación en áreas críticas como la movilidad, la exploración y la vida cotidiana.

Referencias "Para saber más"

[1] D. Csuzdi, T. Bécsi, P. Gáspár et al., "Exact particle flow Daum–Huang filters for mobile robot localization in occupancy grid maps," Springer, 2025. Disponible en: https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-025-01810-2
[2] T. Qin, P. Li, S. Shen, "VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator," IEEE Trans. on Robotics, 2018. Disponible en: https://arxiv.org/pdf/1610.06475
[3] Y. Yang, Y. Liu, X. Lin et al., "OpenVINS: A Research Platform for Visual-Inertial Estimation," ICRA, 2020. Disponible en: https://yangyulin.net/papers/2020_icra_ov.pdf
[4] D. Fox, W. Burgard, F. Dellaert, S. Thrun, "Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots," AAAI, 1999. Disponible en: https://robots.stanford.edu/papers/fox.aaai99.pdf

EL PODER DE LA IONIZACIÓN PARA COMBATIR LA ESCASEZ DE AGUA

Ek Narváez Anthony Alejandro, Erosa Puerto Emilio Hernán, González Pacheco Ana Nicole,
Pech Mena Carlos Santiago, Ramos Reyes Sharon Stephanie
Universidad Politécnica de Yucatán

INTRODUCCIÓN

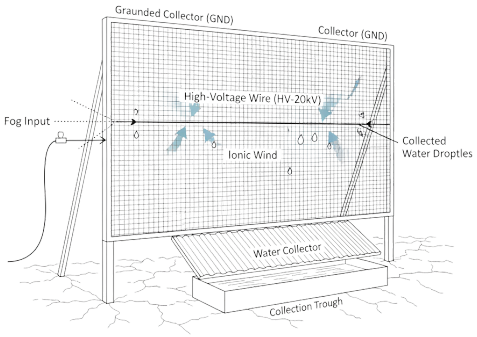
En la Península de Yucatán hay cada vez menos agua por el crecimiento de la población y el uso excesivo del acuífero. Para enfrentar este problema, se propone un dispositivo que obtiene agua del aire, brindando una solución práctica, ecológica y segura para las personas de Yucatán.

LA ESCASEZ DE AGUA

En México, se estima que entre 12 y 15 millones de personas carecen de acceso a agua potable. En Mérida, la escasez de agua es un problema creciente, ya que la ciudad depende del acuífero de la Península de Yucatán, que puede verse afectado por contaminación o fallas en la infraestructura, afectando a la población, la agricultura y el ganado.

¿CÓMO FUNCIONA EL GENERADOR DE AGUA?

Un generador atmosférico de agua funciona usando una fuente que electrifica un cable a alto voltaje (7 kV a 20 kV). Dicho cable pone una carga eléctrica positiva a las gotas de agua en la niebla, las cuales son atraídas a la carga negativa de una malla metálica. Cuando las gotas chocan con la malla, se condensan y caen como agua líquida.



¿SABÍAS QUÉ...?

Con este generador iónico se pueden recolectar de 450 a 500 ml de agua por hora (70% de humedad).

¿CÓMO AYUDARÍA A LA POBLACIÓN?

Este proyecto puede ayudar a las personas que viven en el anillo de cenotes, que abarca más de 58 municipios, y la zona metropolitana de Mérida, que son las áreas más afectadas por la contaminación y falta de agua en Yucatán. El dispositivo genera agua limpia del aire, ayudando a las familias a tener agua potable sin gastar ni contaminar, cuidando el ambiente y mejorando la calidad de vida. Además, este proyecto podría implementarse en otras zonas del país, donde la escasez es aún mayor.

CONCLUSIÓN

El generador de agua iónico ofrece una alternativa innovadora y sostenible para aprovechar la humedad del aire, evitando así la explotación del acuífero. Este proyecto puede ayudar a combatir la escasez de agua en Yucatán y en otras partes del país.

REFERENCIAS

- Damak, M., & Varanasi, K. K. (2018). Electrostatically driven fog collection using space charge injection. Science Advances, 4(6), eaao5323 . https://doi.org/10.1126/sciadv.aao5323
- Plasma Channel. (2025, 21 de febrero). Solving Desert Water Shortages Using 20,000 Volts [Video]. YouTube. http://www.youtube.com/watch?v=G2brxBRnRH4

GREENHOUSE SYSTEM

Ortega Martínez José Lissandro, Sánchez García Chelsy Belem, Cortés-Martínez K.V.
*Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, Puebla, México.

Introducción

El proyecto Greenhouse System surge como una iniciativa para facilitar el cuidado de cultivos en pequeños invernaderos ubicados en zonas cálidas. La solución consiste en un sistema de riego automático que integra sensores de humedad, temperatura y nivel de agua, controlados por una placa Arduino Uno y gestionados a través de una Aplicación Web. Este sistema busca enfrentar los desafíos del estrés hídrico al automatizar la gestión del riego, lo que permite un control preciso y eficiente de los recursos hídricos en el cultivo.

Contenido Principal

El análisis y documentación para el armado de un sistema de riego es necesario para el desarrollo de un riego más eficiente que facilitará el cuidado de cultivos en pequeños invernaderos en zonas calurosas.

¿Sabias que...?

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), informa que se utilizan alrededor de 3,000 litros de agua para producir suficientes alimentos para una persona durante un día.

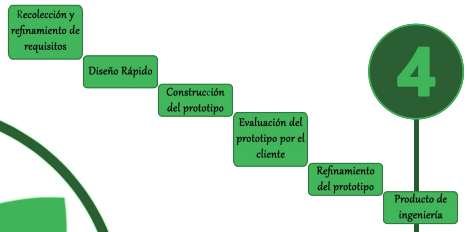
Imágenes y gráficas

Implementamos un sistema que permite regar plantas, optimizando el uso del agua y evitando el riego innecesario.

1

Los resultados esperados es implementar en la pagina web integrada con un sistema de riego automatizado y prevenir el estrés hidrico mediante la gestion precisa del riego, basado en los datos registrados en una base de datos.

4

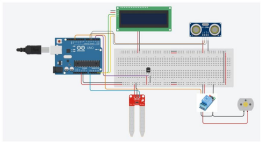


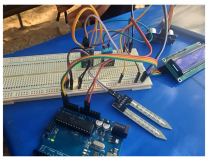
GREEN HOUSE SYSTEM

2

A traves de una pantalla LCD, los usuarios pueden monitorear en tiempo real los niveles de humedad y temperatura.

3





Aunque el sistema no incorpora funciones como notificaciones moviles o llenado automatico del agua, cumple eficazmente su objetivo principal de facilitar el cuidado de los cultivos en un invernadero mediante la tecnologia accesible y funcional.

Aplicaciones o Impacto en la vida cotidiana/entorno

Greenhouse System optimiza el riego en cultivos, reduce el desperdicio de agua, el esfuerzo humano y facilita el cuidado de plantas con tecnología accesible, contribuyendo a una agricultura más eficiente, sostenible y adaptada a climas cálidos

Conclusion o mensaje final

El desarrollo de este sistema de riego automático, que integra un sensor de humedad y una aplicación web, demuestra ser una solución eficaz para optimizar el uso del agua y mejorar el cuidado de las plantas. El uso de tecnología accesible y eficiente no solo promueve prácticas agrícolas más sostenibles, sino que también ofrece a los usuarios una herramienta práctica para gestionar el estrés hídrico en sus cultivos.

Para Saber más

Redacción, & Redacción. (2023, 8 de febrero). Conoce los 4 principales sectores consumidores de agua en México. Greentology. https://greentology.life/hidraulica/conoce-los-4-principales-sectores-consumidores-de-agua-en-mexico/
Rolland, L., & Vega Cárdenas, Y. (2010). La gestión del agua en México. Polis, Vol.6(2), pp.155-188.

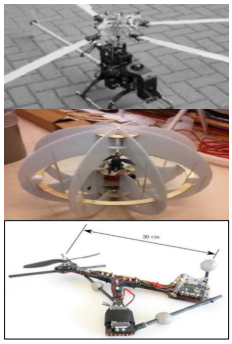
DRON DE UN SOLO ROTOR, ¡INNOVACIÓN EN VUELO!

Carlos Flores Martínez, Jarniel García Morales, Marisol Cervantes Bobadilla, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Carlos Daniel Urbina Alonso, Luis Enrique Calatayud Velázquez.
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Drones: Más que solo juguetes voladores

Los **Vehículos Aéreos no Tripulados** (UAV) comenzaron a usarse con fines militares, específicamente vigilancia remota. Hoy día, se emplea en aplicaciones de agricultura, entrega de paquetes, fotografía, etc. [1].

Dron Monorrotor: El helicóptero moderno

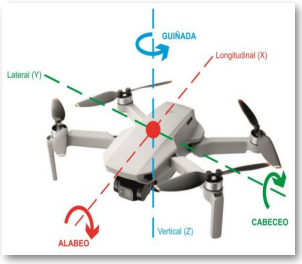


Drones Ornicópteros: Dron sin cola que genera sustentación mediante el movimiento oscilante de sus palas.

Dron multifuncional: Consta de una única hélice y ocho paletas de control encerradas en un marco esférico reforzado

Monospinner: Consta de cinco placas de fibra de carbono, y la electrónica está montada en una jaula de aluminio.

El arte de volar, ¿Cómo se mueve un dron?



Alabeo (Roll): Se consigue un desplazamiento a la izquierda o derecha.
Cabeceo (Pitch): Movimiento de la aeronave hacia delante y hacia atrás.
Guiñada (Yaw): Rotación o giro de la aeronave [2].

Lo que no sabías sobre los drones

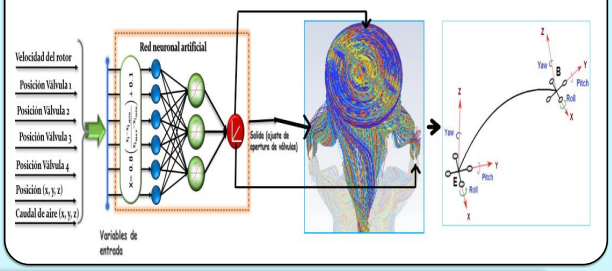
Un dron monorrotor puede consumir hasta 30% menos energía que un cuadricóptero del mismo tamaño. Su principio de vuelo se asemeja al de un helicóptero clásico, pero con sistemas de control electrónico mucho más rápidos

Conoce nuestro Dron Monorrotor

Este dron emplea un solo rotor destinado a mantener el vuelo, para hacerlo utiliza una hélice ductada, la cual, introduce aire hacía la superficie. Ese aire fluye a través de las toberas y finalmente su salida es regulada por válvulas de mariposa que ayudan a controlar el flujo de aire con el fin de estabilizar el dron.

El cerebro detrás del vuelo

Controlando el flujo de aire en cada tobera a través de las válvulas de mariposa puede manipularse el movimiento del dron y dirigirlo hacía una posición deseada [3].



Conclusión

El dron monorrotor representa una alternativa eficiente y ligera, pero su control es más complejo debido a su menor estabilidad natural. Por ello, se requiere el diseño de una estrategia de control que mantenga el equilibrio, la dirección y la altura.

¡No te quedes con la duda!

Aquí encontraras más información relacionada con Drones

[1] R. Ríos Hernández, "Uso de los drones o vehículos aéreos no tripulados en la agricultura de precisión", Revista Ingeniería Agrícola, vol. 11, no. 4, pp. 75-84, Oct - Dic 2021. [Online]. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586268743010
[2] C. Valdivia Miranda, "Drones, principios de vuelo y nuevo marco normativo" Revista Digital de ACTA, 2021. [Online]. Available: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/107001.pdf
[3] E.D. Nieto Guerrero and F.A. Vaca De La Torre, "Desarrollo de un modelo matemático, cinemático y dinámico con la aplicación de software, para modificar el funcionamiento de un dron, para que este realice monitoreo automático" *RECIMUNDO*, vol 4, no. 1 (Edición especial), pp. 332-343, Apr. 2020. [Online]. Available: http://recimundo.com/index.php/es/article/view/814

"Energía en números: cómo las ecuaciones ayudan a entender nuestro metabolismo"

LN. Peña Vazquez Alma Velia*, Mtro. Flores Romero Juan Francisco, Dr. Alonso Bastida Alexis**, Dra. Salazar Piña Dolores Azucena*, Dr. Adam Medina Manuel***

* Facultad de Nutrición, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. **Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública, México. ***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Tecnológico de México.

Introducción

El cuerpo humano necesita energía para mantener sus funciones vitales, incluso cuando estamos descansando. Esa energía se conoce como **Gasto Energético en Reposo (GER)**.

Puede medirse mediante **calorimetría indirecta**, una técnica precisa que analiza el oxígeno y dióxido de carbono de la respiración, pero que resulta **costosa y poco accesible**.

Como alternativa, se emplean **ecuaciones matemáticas** que estiman el GER a partir de variables simples como el peso, la talla, la edad o la composición corporal. Sin embargo, la mayoría fueron desarrolladas en poblaciones extranjeras, por lo que es necesario **crear modelos adaptados a la población mexicana**.

Del laboratorio a la ecuación

En este estudio se midió el **gasto energético en reposo** de adultos mexicanos mediante **calorimetría indirecta** y se realizo **bioimpedancia eléctrica** obteniendo datos como peso, talla, edad y composición corporal. Con esta información se aplicaron **modelos matemáticos** que permitieron identificar las variables más relacionadas con el gasto energético y construir **ecuaciones predictivas adaptadas a la población mexicana**. Estas ecuaciones funcionan como una herramienta práctica que facilita la estimación de energía sin necesidad de equipos costosos. El proyecto integra conocimientos de **nutrición, matemáticas e ingeniería**, mostrando cómo la ciencia puede convertir datos en soluciones reales para mejorar la salud.

Así se construyen las ecuaciones

Mediciónes

Cuestionario sociodemográfico

Talla (cm)

Bioimpedancia eléctrica

Calorimetría indirecta

Modelado matemático

Ecuación de modelo 1:

$$GER_H = 371 + 15.86\,x\,peso \quad (1)$$

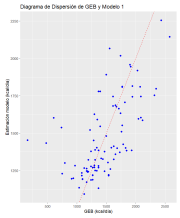
$$GER_M = 655.12 + 9.32\,x\,peso \quad (2)$$

Ecuación modelo 2:

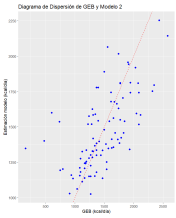
$$GER_H = 355 + 15.834\,x\,peso + 0.1023\,x\,talla \quad (3)$$

$$GER_M = -283.790 + 7.957\,x\,peso + 8.453\,x\,talla \quad (4)$$

Análisis de resultados



Me (RIQ) = 12.058
(-1280.49-217.37)
EN = -3.99
EA = 22022.94



Me (RIQ) = 9.84
(-130.97-207.50)
EN = 23.18
EA = 21852.66

Aplicación en la vida cotidiana

Los resultados permitirán crear ecuaciones predictivas mexicanas, que ayudarán a profesionales de la salud a personalizar planes nutricionales y prevenir enfermedades como el sobrepeso u obesidad, diabetes mellitus, hipertensión, etc.

Además, esta investigación impulsa la colaboración entre ingenieros, matemáticos y nutriólogos, demostrando que la tecnología y los modelos matemáticos pueden transformar los datos en herramientas prácticas que beneficien directamente a la población.

Conclusión

Las matemáticas no solo viven en los números, sino también en cada respiración, en cada célula y en la energía que mantiene con vida nuestro cuerpo. Este tipo de investigaciones muestra cómo la ciencia aplicada puede transformar datos en conocimiento útil, generando herramientas que facilitan la toma de decisiones en salud y nutrición. Al integrar métodos estadísticos es posible crear modelos predictivos más precisos y representativos de la población mexicana, contribuyendo a una atención personalizada y basada en evidencia científica.

Así, la unión entre ingeniería, matemáticas y nutrición se convierte en un ejemplo claro de cómo la ciencia puede mejorar la calidad de vida de las personas.

Referencias "Para saber más"

Sinha S, Kurpad AV, Kuriyan R. Total energy expenditure (TEE) of young adults from urban South India: revisiting their daily energy requirement. European journal of clinical nutrition. 2021;75(5):845-51.

Haugen, HA, Chan, L.-N. y Li, F. (2007), Calorimetría indirecta: una guía práctica para médicos. Nutr Clin Pract, 22: 377-388.

Blasco Redondo R. Resting energy expenditure; assessment methods and applications. Nutr Hosp. 2015 ;31 Suppl 3:245-54.

Diaz BE. Principios y aplicación de las nuevas necesidades de energía según el Comité de Expertos FAO/OMS 2004. Unidad de estadísticas sociales. CEPAL. Santiago de Chile, 2007.

Innovación Digital: Una Respuesta a los Retos de la Salud Escolar

Dra. Cecilia Inés Calderón Ibarra *, Dr. Juan Martín Arzola Monreal *
* Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.

Introducción

El Sistema de Registro de Salud Escolar (SIRESE) es una plataforma digital diseñada para centralizar la información médica de estudiantes en instituciones de educación superior.

Su función principal es mejorar la seguridad escolar al facilitar la atención inmediata en emergencias y prevención de riesgos en estudiantes, generación de reportes y estadísticas de referencia; contribuyendo al bienestar estudiantil y fortaleciendo las políticas públicas en educación y salud.

Contenido principal

¿Qué es SIRESE? Un sistema digital basado en la nube, que organiza y protege la información médica de los estudiantes.
¿Cómo funciona?
• Los datos médicos se capturan al inscribirse.
• Se almacenan de manera segura en la nube.
• Permite consultas rápidas en emergencias y genera reportes para la prevención de riesgos.
¿Por qué es importante? Porque garantiza atención inmediata y fortalece la seguridad escolar.

Imágenes y gráficas

10 Instituciones Educativas más importantes.

Universidades Privadas
Ibero Torreón → 1 547
Universidad Autónoma de La Laguna (UAL) → 1 505
Instituto Ignacio Zaragoza → 1 480
Universidad La Salle Laguna → 1 312
UANE → 1 203
Subtotal Privadas = 7 047 alumnos
Universidades Politécnicas / Tecnológicas
Universidad Tecnológica de Torreón (UTT) → 3 988
Subtotal Politécnicas/Tecnológicas = 3 988 alumnos
Universidades Públicas
UAdeC (Unidad Laguna) → 10 565
UJED (campus Laguna) → 3 758
Subtotal Universidades Públicas = 14 323 alumnos
Tecnológicos (Institutos Tecnológicos)
Instituto Tecnológico de La Laguna (ITL) → 4 984
Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL) → 2 846
Subtotal Tecnológicos = 7 830 alumnos

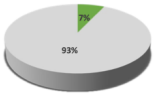
Análisis instituciones educativas ZML Junio 2025

Número de alumnos inscritos.	Instituciones Educativas de Nivel Superior
7,047	Privada
3,988	Politécnica/Tecnológica
14,323	Universidades Públicas
7,830	Tecnológicos
33,188	TOTAL

Ciclo escolar JunIO 2025
Por niveles:
Licenciatura/tecnológica: 49,125
Técnico superior: 3,220
Maestría: 2,495
Género: 27,004 hombres y 30,719 mujeres.
TOTAL : 54,840

FASE 1 ZONA METROP LAG
20,000 1.1 Etapa Regional
20,000 1.2 Etapa Regional
14, 840 1.3 Etapa Regional

¿sabías que…?"



1 de cada 15 estudiantes universitarios (7%), presenta una condición crónica que requiere seguimiento médico constante.

- **Más del 90% de las universidades públicas carecen de un área médica formal.**

SIRESE

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

- Facilita el tiempo de atención y precisión médica al en situaciones de eventos que se presenten relacionados con la salud de los estudiantes.
- Mejora la prevención de enfermedades mediante el análisis de los datos recolectados.
- Apoya a las familias y directivos escolares en la toma de decisiones en base a indicadores reales.
- Contribuye a la construcción de comunidades educativas seguras.
- Cumplimiento de normas NOM-009SSA2-2013.

Conclusión o mensaje final

SIRESE es una solución innovadora que conecta la tecnología con la salud estudiantil. Centraliza información médica, agiliza la atención en emergencias y fortalece la seguridad escolar. Este sistema responde a una necesidad real, demostrando cómo la innovación digital puede mejorar la vida del estudiantado.

Referencias "Para saber más"

Amiif. (2022, 28 noviembre). *Las ENT también impactan la salud de niñas, niños, adolescentes y jóvenes*. AMIIF. https://amiif.org/las-ent-tambien-impactan-la-salud-de-ninas-ninos-adolescentes-y-jovenes/

Portal INSP. (s. f.). https://www.insp.mx/avisos/presentan-resultados-de-la-ensanut-2020-2023

INTERCOMUNICADOR BASADO EN EL MOVIMIENTO OCULAR.

" Devolviendo la voz a quienes el cuerpo les ha quitado la palabra "

Sibaja, Shunaxhi del Carmen*, Ángeles, Jessica *, Pinto, Arturo*
* Universidad Politécnica de Chiapas.

Introducción

Numerosas personas con condiciones neurológicas (ELA, parálisis cerebral, lesiones medulares, síndrome de enclaustramiento y ACV) pierden su capacidad motora y de comunicación, quedando "atrìapadas" en cuerpos que no responden mientras sus funciones cognitivas permanecen intactas.
El intercomunicador virtual es un sistema de detección de iris por cámara web y algoritmos de aprendizaje automático que transforma movimientos oculares en escritura y comunicación. A diferencia de opciones comerciales de 15,000 USD, esta solución es accesible y de bajo costo, reconociendo la comunicación como un derecho humano fundamental, no un privilegio económico.

Contenido principal

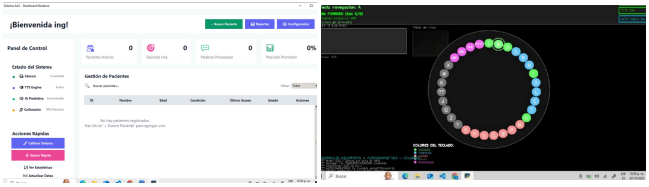
¿De qué manera se puede volver a comunicar un paciente con ELA? Con la ayuda del intercomunicador virtual, la persona puede comunicar sus necesidades a quienes lo rodean mediante una interfaz intuitiva.
El sistema utiliza una pantalla portátil con atajos programables para facilitar la comunicación. Para la navegación, se estableció detección de movimientos oculares con tres opciones de selección: por la izquierda, derecha o centro. Un caso similar fue desarrollado en 1986 para Stephen Hawking, quien utilizó una herramienta que le permitió comunicarse de manera fácil y continuar su trabajo científico a pesar de tener ELA.

"¿Sabías que...?" 💡

Los ojos se convierten en la ventana principal de comunicación, muchas enfermedades que limitan el movimiento corporal preservan intacto el control ocular, como lesiones medulares, paraisis cerebral y accidentes cerebrovasculares, los ojos mantienen movimientos precisos, nuestro sistema transforma estos movimientos oculares en texto, dando una alternativa de comunicación accesible para personas que han perdido la capacidad de hablar o poder expresarse.

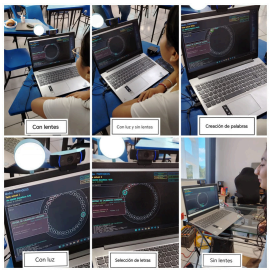
Imágenes y gráficas

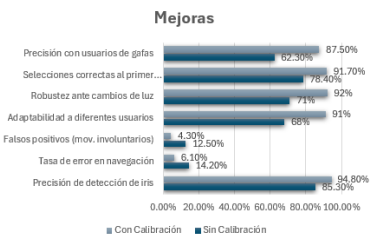
Visualización de la pantalla principal



Pruebas y resultados

Métrica de Evaluación	Sin Calibración	Con Calibració	Mejora (%)
Precisión de detección de iris	85.30%	94.80%	11.10%
Tasa de error en navegación	14.20%	6.10%	-57.00%
Falsos positivos (mov. involuntarios)	12.50%	4.30%	-65.60%
Adaptabilidad a diferentes usuarios	68%	91%	33.80%
Robustez ante cambios de luz	71%	92%	29.60%
Selecciones correctas al primer intento	78.40%	91.70%	17.00%
Precisión con usuarios de gafas	62.30%	87.50%	40.40%
Tiempo de sesión sin fatiga (min)	18.5 min	32.7 min	76.8min
Frustración del usuario (escala 1-10)	6.8	3.2	-52.9





Impacto en la vida cotidiana

El silencio puede ser tranquilo y reconfortante, pero cuando es lo único que te queda para afrontar el día, se convierte en una carga. **En México, cada día 170 personas sufren un accidente cerebrovascular y miles más viven con ELA, parálisis o lesiones medulares.**
Este sistema cambia una realidad donde la capacidad de comunicarse es crucial para el sentir humano. Cuando los doctores afirman los síntomas, la familia interpreta los gestos, y los pacientes se frustran al no poder expresar qué les duele o qué necesitan, la comunicación se vuelve un desafío diario. Esta tecnología permite que las personas en plática con sus familiares simplemente digan lo que sienten. Los estudios muestran que esto reduce la depresión del 80% al 30%, porque vuelven a ser personas, no solo pacientes, recuperando autonomía y dignidad.

Mensaje final

En esta tecnología de comunicación basado en movimientos oculares representa una solución accesible. El proyecto permite a pacientes con perdida de movimiento conservando su independencia en lo que respecta a la comunicación mediante un sistema que detecta movimientos oculares básicos logrando así traducirlos a textos, dando como resultado poder reducir el aislamiento social y mejorando la calidad de vida. Es más que un aparato tecnológico, es una herramienta de esperanza que le devuelve la voz a aquellos que la han perdido.

Referencias

- Entender la ELA - AdELA. (2025, 19 junio). adELA. https://adelaweb.org/entender-la-ela/
- Lorenceau, J. (2012). Cursive writing with smooth pursuit eye movements. Current Biology: CB, 22(16), 1506–1509. https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.06.026
- Comunicación Asistida por Seguimiento Ocular. (s/f). Asistronic.com. Recuperado el 26 de septiembre de 2025, de https://www.asistronic.com/comunicacion-asistida-por-escaneo-ocular/?srsltid=AfmBOoq_cH2Ck2n7sw3obSmrDQYyEB5jIXsUUGhwSGWBi1yJ6BtIBOHs
- Lector ocular o eye-tracker. (2021, diciembre 10). Plena inclusión; Plena inclusión España. https://www.plenainclusion.org/discapacidad-intelectual/recurso/lectores-oculares-o-eye-tracker/
- (S/f). Nih.gov. Recuperado el 26 de septiembre de 2025, de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK556151/

Vigilancia genómica de virus respiratorios y arbovirus en México

Blanca Taboada[1], Esteban Munoz-Medina[2], Alejandro Sanchez-Flores[1], Alfredo Herrera[3], Angel Salas-Lais[4], Alejandro Uscanga[35], Alida Zárate[1], Selene Zárate[6]

[1] Instituto de Biotecnología, UNAM; [2] Coordinación de Calidad de Insumos y Laboratorios Especializados, IMSS; [3] Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad, CINVESTAV, IPN; [4] Laboratorio Central de Epidemiología, IMSS; [5] Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas, UAEM; [6] Posgrado en Ciencias Genómicas, UACM;

Introducción

La vigilancia genómica en México permite seguir la evolución de virus como SARS-CoV-2, influenza, RSV, dengue, zika y chikungunya.

CoViGen-Mex reúne instituciones académicas y de salud para generar y analizar genomas virales, fortaleciendo la detección temprana y la respuesta ante brotes y pandemias.

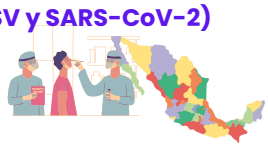
Contenido principal

- Más de **40,000 genomas virales secuenciados en México** (SARS-CoV-2, influenza, RSV y dengue).
- Identificación de variantes dominantes y análisis evolutivos y de dispersión.
- Evaluación de relaciones entre linajes virales, clima y movilidad humana.
- Análisis masivo de genomas virales mediante Python y R.
- **Detección** metagenómica de **virus nuevos y conocidos desarrollando modelos de deep learning.**

¿Cómo hacemos la vigilancia genómica?

1 Monitoreo (influenza, dengue, RSV y SARS-CoV-2)

A través del sistema de vigilancia del **IMSS** se recolectan **muestras a nivel nacional**, identificando entidades federativas clave para su selección.



2 Extracción de RNA y DNA y construcción de librerías.

En el IMSS se realiza la extracción de RNA/DNA y en dos unidades de secuenciación masiva se preparan las bibliotecas.

3 Secuenciación

En las dos unidades se lleva a cabo la secuenciación masiva.

- Hasta **600 muestras** al mismo tiempo.
- **1,000,000,000 de secuencias cortas (75–150 pb).**

4 Análisis bioinformático y generación de genomas

Se generan genomas virales usando métodos bioinformáticos.

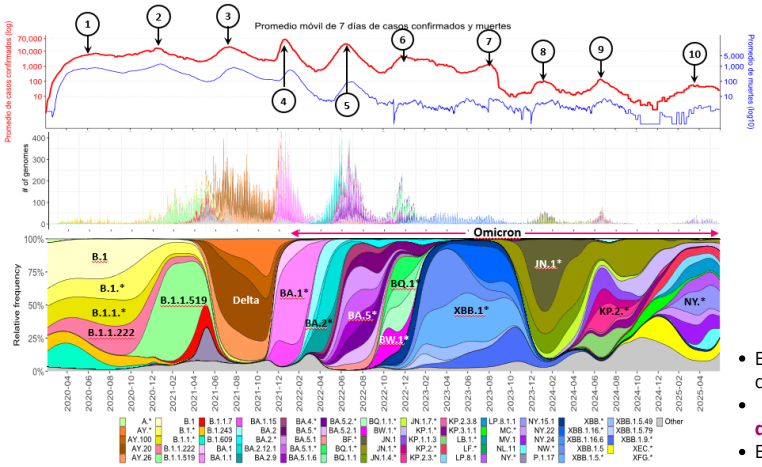
5 Identificación de variantes o nuevos virus

Se **identifican las variantes** de los virus presentes en las muestras y se analiza su evolución y dispersión a nivel nacional, a lo largo del tiempo, **usando métodos filodinámicos.**

6 Difusión de resultados

Se entregan al InDRE y se difunden a través de CoViGen-Mex y sus redes sociales y bases de datos como GISAID, garantizando el acceso global a la información genómica. Asimismo, se publican en revistas científicas indexadas.

Aplicación de la vigilancia genómica: evolución del SARS-CoV-2 en México durante la pandemia



- México ha registrado **10 picos epidemiológicos** de COVID-19, confirmándose más de **7.63 millones de casos** y más de **335,000 defunciones**.
- Se han secuenciado **100,186 genomas virales**, de los cuales cerca del **40% fueron generados por nuestro grupo**.
- Se han identificado **1,118 variantes; 96** alcanzaron una frecuencia **mensual ≥5% y 43 ≥10%**.
- Se han elaborado más de 90 reportes de divulgación y técnicos para el InDRE.
- Además, se han publicado **16 artículos científicos en revistas indexadas en el JCR.**

Vigilancia genómica del dengue

- En 2023, se registró un incremento sin precedentes de casos de dengue.
- Mediante análisis genómicos, **se identificó un nuevo subtipo de DENV3.**
- Esto resalta la importancia de una vigilancia activa y continua para anticipar brotes y fortalecer las acciones de salud pública.

Impacto y Conclusión

La **vigilancia genómica**, apoyada por la **bioinformática**, permite comprender la **diversidad y evolución de los virus en México** y prepararse ante futuras epidemias. Además, permite detectar variantes emergentes, apoyar decisiones de salud pública y fortalecer la infraestructura científica del país. Nuestro trabajo ejemplifica la colaboración interinstitucional entre ciencia y tecnología.

Financiamiento actual

- **CBF-2025-I-1026 de la SECIHTI (BT)**
- **SECTEI/138/2024 (SZ)**

Referencias

- Taboada,B., Zarate,S., et al., (2026). Genomic Diversity and Geographic Distribution of SARS-CoV-2 in Mexico: Insights From 4 Years of Genomic Surveillance. *Archives of Medical Research,* 57 (2).
- Taboada-Ramirez,B.I., Zarate-Guerra,C.S. (2025). El papel de la bioinformática en la lucha contra los virus. *Biotecnología en Movimiento*, 10 (40).

Aprovechamiento de los metabolitos secundarios producidos por hongos entomopatógenos endófitos para el biocontrol en el cultivo de maíz

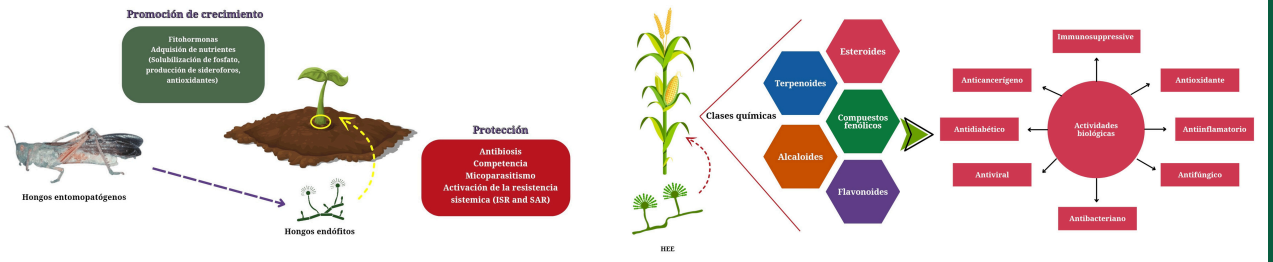
Hannia Mancha Rosales*, Oralia Antuna Grijalva**, Miriam P. Luévanos Escareño*
* Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Biológicas, Torreón Coahuila, México.
** Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, México.

Introducción

Una de las principales problemáticas que debe ser atendida en México es la soberanía alimentaria eliminando el uso de agroquímicos nocivos en cultivos de interés que son destinados al consumo, ya que impactos negativos en su rendimiento traerían consecuencias para la seguridad alimentaria, como es el caso del maíz (SIAP & SANDER, 2024; Liao *et al.*, 2022).

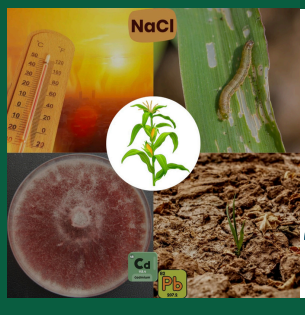
Contenido principal

Los hongos entomopatógenos se han desarrollado como alternativas respetuosas con el medio ambiente al ser utilizados como agentes de biocontrol, moderando las poblaciones de insectos (Sasan, RK, 2012). Además, se ha demostrado que tienen interacciones planta-hongo y se les denominan hongos endófitos. Son aquellos que habitan dentro de las especies vegetales sin perjudicar al huésped, su acumulación de metabolitos secundarios pueden actuar como reguladores del crecimiento y defensa para las plantas. Los géneros *Beauveria*, *Metarhizium* y *Aspergillus* son los mas utilizados debido a sus mecanismos de infección y sus tasas de mortalidad (Ahsan *et al*, 2024; Sahu & Mishra, 2021).



¿Podremos alimentar a una población en incremento con un cultivo bajo amenaza?

La producción del maíz es frenada por una crisis silenciosa: sequías, plagas y enfermedades que el cambio climático intensifica. Mientras la población crece, estos estreses abióticos y bióticos reducen cosechas. La solución no está solo en producir más, sino en tener una estrategia sostenible. El control biológico se presenta como un alternativa prometedora: usar hongos benéficos para combatir plagas de forma natural y promover el crecimiento de la plantas es clave para asegurar cosechas estables y garantizar comida para todos sin dañar el planeta.



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Agricultura

Biotecnología

Medicina

Conclusión o mensaje final

Es necesario desarrollar herramientas en la biotecnología agrícola que nos permitan aprovechar los metabolitos secundarios de los hongos entomopatógenos endófitos para el mejoramiento de los cultivos, mitigando el efecto de los agroquímicos (Adeleke *et al.*, 2022; Orozco-Mosqueda *et al.*, 2021).

Referencias "Para saber más"

Ahsan, S. M., Injamum-Ul-Hoque, M., Das, A. K., Rahman, M. M., Mollah, M. M. I., Paul, N. C., & Choi, H. W. (2024). Plant–Entomopathogenic Fungi Interaction: Recent Progress and Future Prospects on Endophytism-Mediated Growth Promotion and Biocontrol. *Plants*, 13(10), 1420. https://doi.org/10.3390/plants13101420
Sasan, R. K., & Bidochka, M. (2012). The insect-pathogenic fungus Metarhizium robertsii (Clavicipitaceae) is also an endophyte that stimulates plant root development. *American Journal of Botany*, 99(1), 101-107. https://doi.org/10.3732/ajb.1100136
Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) & Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2024). Panorama Agroalimentario 2024. *En servicio de información Agroalimentaria y Pesquera*. https:www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035

Diseño y construcción de un germinador de forraje para ganado

Erick Gazca Cecilio , David Peñafort Guerrero, Yadira Jiménez Gallardo , Yael Antonio Navarrete Martínez ,
M.C. Donaciano Flores Gaspar
Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio

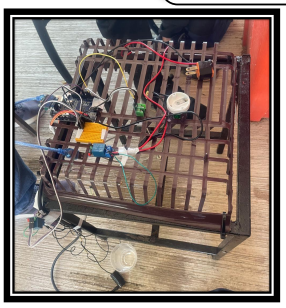
Introducción

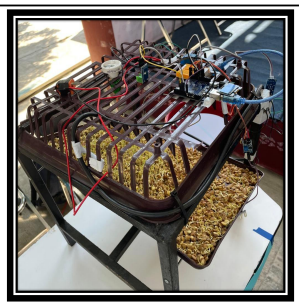
La producción de forraje verde hidropónico (FVH) representa una alternativa sustentable para la **alimentación del ganado**, ya que permite generar alimento fresco, nutritivo y con bajo consumo de agua. Sin embargo, la adopción de estos sistemas en comunidades rurales se ve **limitada por los costos y la falta de automatización**. Por ello, se diseñó y construyó un germinador de bajo costo con control automatizado, capaz de mantener **condiciones óptimas de humedad, temperatura y riego** para maximizar el rendimiento y reducir el uso de recursos.

Contenido principal

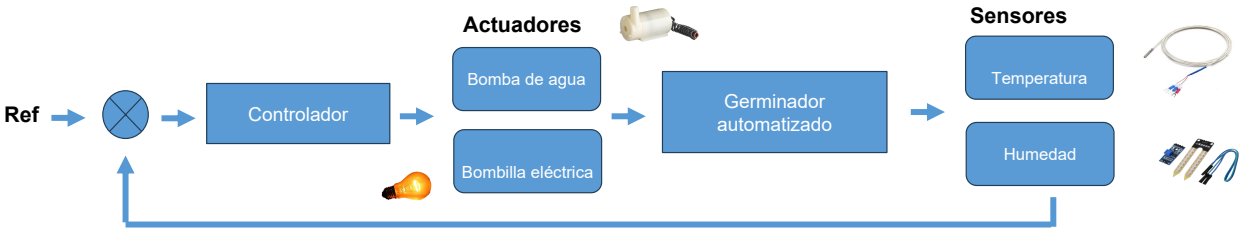
Una **germinadora de forraje** permite cultivar cereales o legumbres (como cebada, maíz, trigo o avena) sin suelo, esto facilita la producción sostenible y continua.
El sistema se compone de una estructura cerrada con bandejas donde las semillas germinan y crecen rápidamente, formando una "alfombra verde" rica en nutrientes.
El diseño incorpora sensores de **temperatura, humedad, tarjeta arduino para el control lógico, una bomba de agua y una bombilla eléctrica**, los cuales mantienen condiciones ideales de crecimiento.

Imágenes y gráficas





Materiales:
1. Base metálica y plástica
2. Bombilla eléctrica
3. Arduino
4. Una bomba de agua.
5. Relevadores
6. Protoboard.
7. Aspersores
8. Manguera
9. Pantalla o led
10. Charola de germinación



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Permite producir FVH durante todo el año, incluso en épocas de sequía, asegurando la nutrición de ganado (bovinos, caprinos, ovinos, aves y conejos). El proceso se realiza en contenedores de plástico rígido (charolas) por un **periodo de entre 10 y 14 días**, con riegos de agua hasta que los **brotes alcancen un largo de 3 a 4 cm**. Un germinador hidropónico puede ahorrar hasta un 60–80% de agua frente a la agricultura convencional. Un **1 kg de semilla puede producir aproximadamente 7 kg de forraje**. Además con la aplicación de sistemas de control electrónico se pueden lograr que el sistema sea mas eficiente reduciendo los días de germinado y un mejor crecimiento.

Conclusión o mensaje final

Mediante la **implementación de sistemas de control automático**, es posible **optimizar las condiciones de crecimiento** del garantizando un desarrollo uniforme y eficiente. Además, estos sistemas tienen áreas de mejora e investigación en sistemas de **automatización avanzada, implementar energías renovables, monitoreo remoto IoT, control de nutrientes y la posible escalabilidad de los sistemas FVH.**

Referencias "Para saber más"

Juárez-lópez, P., Morales-rodríguez, H. J., Sandoval-villa, M., Danés, A. G., Cruz-crespo, E., Juárez-rosete, C. R., Aguirre-ortega, J., Alejo-santiago, G., Ortiz-catón, M., & Fvh, V. (2013). *Producción de forraje verde hidropónico*. *13*. http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/2126

López-Aguilar, Raúl, Murillo-Amador, Bernardo, & Rodríguez-Quezada, Guadalupe. (2009). El forraje verde hidropónico (FVH): Una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia*, *34*(2), 121-126. Recuperado en 11 de noviembre de 2025, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000200009&lng=es&tlng=es.

Zagal-Tranquilino, Marcelino, Martínez-González, Sergio, Salgado-Moreno, Socorro, Escalera-Valente, Francisco, Peña-Parra, Bladimir, & Carrillo-Díaz, Fernando. (2016). Producción de forraje verde hidropónico de maíz con riego de agua cada 24 horas. *Abanico veterinario*, *6*(1), 29-34. Recuperado en 11 de noviembre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-61322016000100029&lng=es&tlng=es.

VALORIZACIÓN DEL COTILEDÓN DE MANGO

Vázquez-Ontiveros Martha Elena*, Quintero-Soto María Fernanda*, Chavez-Millan Estrella Melisa*
*Doctorado en Biotecnología Agropecuaria. Universidad Politécnica del Mar y la Sierra.

Introducción

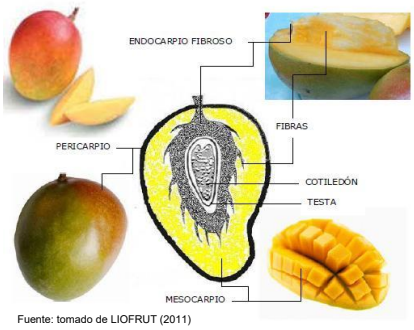
El cotiledón de mango es un residuo agroindustrial dentro del proceso de despulpado del fruto que representa un alto porcentaje de la cantidad de desperdicios, el cual se convierte en una fuente de contaminación sólida que impacta el medio ambiente al no contar con políticas adecuadas para su manejo. Ésta por su composición se puede constituir en una **materia prima** para la obtención de nuevos ingredientes que pueden ser utilizados en diversas áreas.

Contenido principal

La semilla representa entre el **10 y 25% del peso total del fruto**, y dentro de ella, el **cotiledón** es la parte más importante en términos de biomasa y nutrientes.
El cotiledón de mango se caracteriza por su **composición química**, donde destaca el **almidón** con hasta un 60 %, 6-13 % de **proteína**, 8-15 % de **lípidos** y **antioxidantes** naturales como **polifenoles y flavonoides**.
El subproducto se puede emplear para elaborar harinas, extraer aceites vegetales, para la fabricación de biopolímeros y empaques biodegradables, como parte de la formulación para hacer alimentos balanceados y para elaborar productos nutraceúticos.

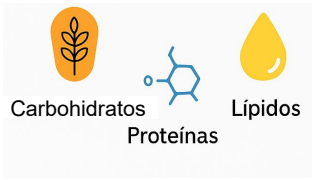
Imágenes y gráficas

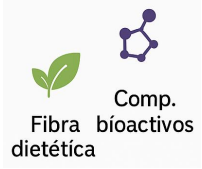
Partes del mango



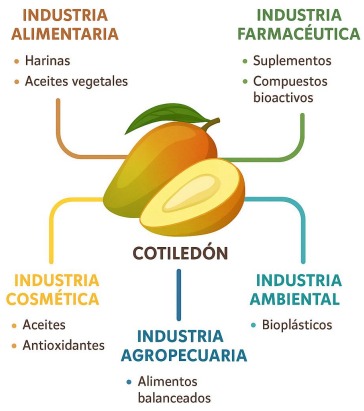
Fuente: tomado de LIOFRUT (2011)

Composición química





Aprovechamiento del cotiledón de mango



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Entre los **usos potenciales del cotiledón de mango** destaca el uso de **harinas** para emplearse en panificación o como sustituto parcial de harinas tradicionales; **aceites vegetales** útiles en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica; **biopolímeros o empaques biodegradables**, gracias a su almidón, se estudia para la fabricación de plásticos biodegradables; **alimentos balaceados** al ser aprovechados en la formulación de piensos para animales y **nutraceúticos**, al presentar compuestos bioactivos tiene potencial en la elaboración de suplementos antioxidantes.
Entre las **ventajas del aprovechamiento** del cotiledón de mango están la reducción del impacto ambiental, genera valor agregado en la cadena agroindustrial y contribuye a la economía circular, alineándose con los principios de sustentabilidad.

Conclusión o mensaje final

El **cotiledón del mango** es un subproducto con alto potencial por su riqueza en almidón, aceites y compuestos bioactivos. Su aprovechamiento abre oportunidades en la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica y de materiales biodegradables, representando un ejemplo claro de **valorización de residuos agroindustriales**.

Referencias "Para saber más"

González-Sosa, A., Martínez-Ávila, G.C.G., Medina-Herrera, N., Tafolla-Arellano, J.C., Rojas-Molina, R. (2023). Extraction and partial characterization of polyphenols from mango Ataulfo peels, seed, and kernel. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, 10 (60): 49-59.
Lanjekar-Kavita, J; S

Salazar Sánchez, M. del R., & Solanilla Duque, J. F. (2023). Tendencias en el aprovechamiento de residuos de mango para la obtención de materiales no alimentarios. @limentech, Ciencia Y Tecnología Alimentaria, 21(1), 127–146. https://doi.org/10.24054/limentech.v21i2.2742

Coral Velasco, D., & Cuesta González, F. A. (2019). Aprovechamiento de semilla de mango en el desarrollo de galletas para consumo humano. *Revista Teinnova*, *4*, 32–39. https://doi.org/10.23850/25007211.2945

Rubiano-Charry, K.D.; Ciro-Velásquez, H.J.; Aristizabal-Torres, I.D. (2019). Aprovechamiento de los subproductos del mango, como fuente de compuestos bioactivos, para la elaboración de rollos comestibles. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 22(2):e1078. http://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1078

YACA: FRUTO INFRAVALORADO EN LA REGIÓN ELOTA-PIAXTLA CON POTENCIAL EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.

Estrella Melisa Chavez-Millan*, Martha Elena Vázquez-Ontiveros*, María Fernanda Quintero-Soto*
*Doctorado en Biotecnología Agropecuaria, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra

Introducción

Ante la creciente necesidad de innovar en el desarrollo de alimentos funcionales ricos en nutrientes y compuestos bioactivos con beneficios para la salud, resulta fundamental explorar materias primas poco utilizadas y valoradas.

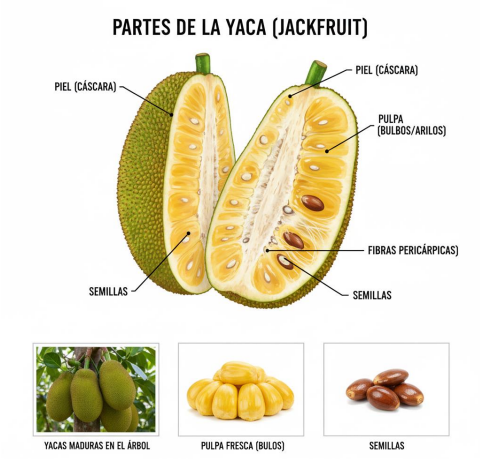
La yaca es un fruto proveniente de la india, y actualmente se ha identificado su existencia en la región Elota-Piaxtla. Este fruto es consumida por una pequeña parte de la población en presentación como agua fresca y malteada; siendo este una fuente importante de compuestos que ayudan a mejorar la salud humana y es una alternativa para la producción de alimentos saludables a base de materias primas no convencionales.

Contenido principal

La yaca es un árbol perene que pertenece a la familia *Morácea*, nutricionalmente es rico en carbohidratos, fibra, grasas, vitaminas y minerales, predominando la vitamina c y el potasio. Debido a que cuenta con compuestos bioactivos como oxalatos, taninos, alcaloides y flavonoides; este fruto presenta algunas actividades biológicas, como son actividad antimicrobiana, antioxidante, antinflamatoria, antifúngica y antidiabética, las cuales se les atribuyen a sus compuestos bioactivos.

Es una alternativa viable para elaborar productos de consumo frecuente que le atribuyan al consumidor además de saciedad, propiedades benéficas para la salud.

Imágenes y gráficas



Composición	Fruta madura
Proteína (g/ 100 g)	1.2 - 1.9
Carbohidratos (g/ 100 g)	16.0 - 25.4
Fibra (g/ 100 g)	1.0 - 1.5
Potasio (mg/ 100 g)	191-407

Carotenoides	Concentración (µg/100 g b.h.)
9-cis-Neoxantina	6.87
cis-Luteoxantina	0.34
trans-luteina	37.02
trans-zeinoxantina	1.72
15-cis- β-Caroteno	0.18
13-cis- β-Caroteno	2.45
9-cis- β-Caroteno	0.79

Adaptada de Ranasinghe et al. 2019

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

El fruto de yaca es consumido normalmente en aguas frescas o en licuado, como botana saludable deshidratada, en estado fresco con sazonadores preferentes al consumidor, en bebida fermentada, así como alimentos industrializados (destaca la jalea, mermelada, polvo de la fruta), en postres y como complemento en barras energéticas saludables. El consumo de productos ricos en fitoquímicos y nutrientes permiten contrarrestar la aparición de enfermedades relacionadas con la alimentación.

Conclusión o mensaje final

La investigación encaminada a identificar alimentos con propiedades benéficas para la salud y de bajo consumo permiten ofrecer una alternativa saludable sobre alimentos industrializados de uso frecuente que solo cubren la necesidad de consumo, siendo el fruto de la yaca un alimento con potencial aplicación en la producción de alimentos industrializados y con ello elevar el consumo con tan amigables propiedades.

Tu como consumidor ¿qué elegirías?, un alimento rico y saludable o solo un alimento rico.

Referencias "Para saber más"

Amadi, J. A., Ihemeje, A., & Afam-Anene, O. C. (2018). Nutrient and phytochemical composition of jackfruit (Artocarpus heterophyllus) pulp, seeds and leaves. *International Journal of Innovative Food, Nutrition and Sustainable Agriculture*, *6*(3), 27-32.

Prakash, O., Kumar, R., Mishra, A., & Gupta, R. (2009). Artocarpus heterophyllus (Jackfruit): an overview. *Pharmacognosy reviews*, *3*(6), 353.

Ranasinghe, R. A. S. N., Maduwanthi, S. D. T., & Marapana, R. A. U. J. (2019). Nutritional and health benefits of jackfruit (Artocarpus heterophyllus Lam.): a review. *International journal of food science*, *2019*(1), 4327183. https://doi.org/10.1155/2019/4327183

Clasificación Inteligente de Movimientos por Visión Computacional para Manufactura Inteligente en PyMEs

Armando Mares Castro [1]*, José Ramón Gómez Armenta [1], Mario Guadalupe Moreno Salcido [1]
[1]Departamento de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón, Bivd. del Valle 2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón 36413, México**

Introducción

En la era de la Industria 4.0 y 5.0, la manufactura requiere herramientas inteligentes que integren eficiencia y diseño centrado en el ser humano.

Los estudios de tiempos y movimientos, como el MTM-2, son esenciales para optimizar procesos, pero su aplicación manual es lenta, costosa y propensa a errores.

Este trabajo presenta un sistema automatizado basado en Visión por Computadora que utiliza el algoritmo KNNs para clasificar movimientos industriales en tiempo real. Además de agilizar el análisis de tiempos, el sistema identifica proactivamente riesgos ergonómicos, ofreciendo una solución escalable y accesible para las PyMEs, que favorece tanto la productividad como el bienestar del trabajador.

Contenido principal

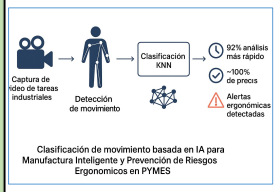
¿El Problema?
Analizar manualmente los movimientos de un trabajador en una fábrica es como medir el tiempo de una carrera con un cronómetro de mano: es lento, impreciso y no se puede hacer siempre.

Nuestra Solución: Un "Asistente Visual"
Usamos una cámara e inteligencia artificial que observa al operario. El sistema reconoce sus articulaciones y mide los ángulos de sus brazos y muñecas en tiempo real, como un entrenador deportivo que analiza los movimientos de un atleta.

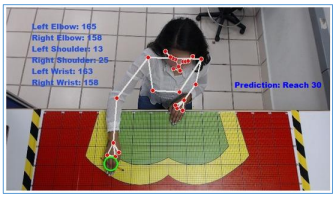
¿Qué Logra el Sistema?
- Clasifica Movimientos Básicos: Identifica automáticamente acciones como "alcanzar" o "colocar" un objeto, agilizando enormemente los estudios de tiempo.
- Previene Lesiones: Detecta posturas riesgosas, como una muñeca doblada en un ángulo peligroso, y alerta para prevenir problemas de salud.

El Resultado
Una herramienta rápida, económica y objetiva que ayuda a las fábricas, especialmente a las PyMEs, a ser más eficientes y cuidar el bienestar de sus trabajadores.

Imágenes y gráficas



Fuente: https://doi.org/10.3390/app152010914 (Gráphical abstract)



Fuente: Mares-Castro, A., Calzada-Ledesma, V., Becerra-Rodríguez, M. B., Santiago-Montero, R., & Estrada-Monje, A. (2025). Intelligent Motion Classification via Computer Vision for Smart Manufacturing and Ergonomic Risk Prevention in SMEs. Applied Sciences, 15(20), 10914. https://doi.org/10.3390/app152010914

Sección "¿sabías que…?"

Un estudio tradicional de tiempos y movimientos (MTM) para un proceso manual puede requerir hasta 4 días de trabajo de un especialista, siendo un proceso lento y costoso. Nuestro sistema de Inteligencia Artificial clasifica los mismos movimientos con una precisión del ~100% en menos de un segundo por muestra.

Esta automatización no solo acelera drásticamente el análisis, sino que también identifica proactivamente posturas riesgosas, como la hiperextensión de la muñeca, fusionando así la eficiencia industrial con el bienestar del trabajador en la era de la Industria 5.0.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Este sistema ayuda que los análisis de métodos sean más accesibles considerando además elementos ergonómicos mediante clasificación inteligente. Algunas ventajas son:
- Menor Riesgo de Lesiones: Detecta posturas incómodas que, con el tiempo, causan dolor de espalda o muñeca.
- Ejemplo: Alerta si un operario pasa horas con la muñeca doblada al ensamblar un teléfono.

Para las Empresas y Consumidores:
- Productos Más Baratos: Al optimizar los tiempos de producción, las PyMEs pueden reducir costos.
- Ejemplo: Un fabricante local de muebles puede abaratar sus productos al hacer su proceso más eficiente.

Calidad y Disponibilidad: Ayuda a que las fábricas pequeñas sean más competitivas, manteniendo los empleos y la producción en tu comunidad.

Conclusión o mensaje final

La manufactura del futuro no solo es automatizada, es inteligente y humana.

Demostramos que es posible automatizar los estudios de tiempo con una precisión del 100% y, al mismo tiempo, cuidar la salud del trabajador mediante la evaluación ergonómica en tiempo real.
Esta solución accesible elimina las barreras para que las PyMEs adopten la Industria 4.0/5.0, fusionando eficiencia operativa con bienestar laboral.

El futuro de la producción está en la colaboración entre la inteligencia artificial y el talento humano.

Referencias "Para saber más"

a. Mares-Castro, A., Calzada-Ledesma, V., Becerra-Rodríguez, M. B., Santiago-Montero, R., & Estrada-Monje, A. (2025). Intelligent Motion Classification via Computer Vision for Smart Manufacturing and Ergonomic Risk Prevention in SMEs. Applied Sciences, 15(20), 10914. https://doi.org/10.3390/app152010914
b. Andreopoulos, E., Gorobetz, V., & Kunz, A. (2024). Automated Transcription of MTM Motions in a Virtual Environment. Lecture Notes in Networks and Systems, 1012, 243–259. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57835-2_19
c. Gorobets, V., Holzwarth, V., Hirt, C., Jufer, N., & Kunz, A. (2021). A VR-based approach in conducting MTM for manual workplaces. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 117(7), 2501–2510. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07807-8
d. Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. En Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 4510–4520).
e. Yang, Z., Song, D., Ning, J., & Wu, Z. (2024). A Systematic Review: Advancing Ergonomic Posture Risk Assessment through the Integration of Computer Vision and Machine Learning Techniques. IEEE Access, 12, 180481–180519. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3481422

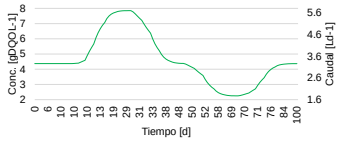
EVALUACIÓN DINÁMICA DEL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA MEDIANTE EL MODELO REDUCIDO ADM1-R4

Josué Rodas Citalán, José Luis Ruiz Maldonado, René Alejandro Flores Estrella
Instituto Tecnológico de Tapachula – El Colegio de la Frontera Sur Unidad Tapachula

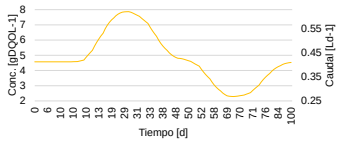
INTRODUCCIÓN

El **tratamiento de aguas residuales** es clave para proteger el medio ambiente y aprovechar los recursos que normalmente se desechan. La **digestión anaerobia** es un proceso biológico que transforma la materia orgánica de estas aguas en **biogás**, principalmente **metano**, que puede ser usado como fuente de **energía renovable**. Este proceso, llevado a cabo por microorganismos, ayuda a reducir la **contaminación y promueve la sostenibilidad**.

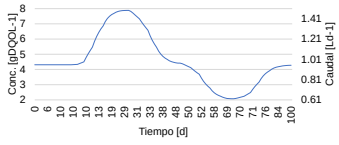
IMÁGENES Y GRÁFICAS



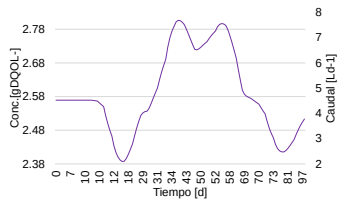
Dinámica de los carbohidratos particulados (X_ch).



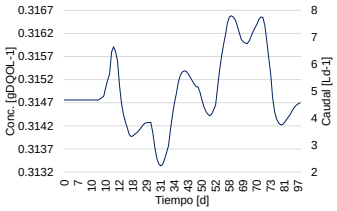
Dinámica de los lípidos (X_li).



Dinámica de las proteínas solubles (S_pr).



Evolución de la biomasa bacteriana (X_bac) durante 100 días de simulación.



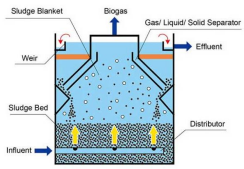
Producción de metano en fase gaseosa (Sgas_CH_4).

CONTENIDO PRINCIPAL

- ✓ ***¿Qué es un modelo de digestión anaerobia?***
  Un modelo matemático como el ADM1-R4 es una herramienta que "simula" cómo se **comportan** los microorganismos dentro de un digestor anaerobio. Esto permite **predecir** cómo **cambiarán** las concentraciones y la producción de metano bajo distintas condiciones.
- ✓ ***Simulaciones: cómo funciona el digestor***
  Mediante el modelo ADM1-R4, se pueden realizar simulaciones de un digestor anaerobio durante varios días, ajustando parámetros como el flujo de entrada de residuos. Estas simulaciones muestran cómo la biomasa y los sustratos **evolucionan** con el tiempo, y cómo se **produce** metano de manera estable, incluso cuando los residuos se suministran de forma irregular.
- ✓ ***Interpretando los resultados***
  Las simulaciones permiten identificar patrones claros: **un flujo constante mantiene estable la biomasa, mientras que un aumento brusco puede reducirla temporalmente**. Los carbohidratos y lípidos son más sensibles a cambios en la alimentación, mientras que las proteínas se degradan de forma más gradual. El metano producido refleja la eficiencia energética del digestor y confirma que el proceso puede generar energía limpia a partir de residuos.

APLICACIONES O IMPACTO EN LA VIDA COTIDIANA / ENTORNO

Los digestores anaerobios ayudan a **transformar** los residuos orgánicos de hogares, industrias y granjas en **energía** limpia, reduciendo la contaminación de ríos y suelos. Gracias a simulaciones como las del ADM1-R4, es posible **diseñar** y **operar** estas plantas de manera más eficiente, asegurando que la producción de metano sea estable y segura. En la práctica, esto significa que las ciudades **pueden generar parte de su electricidad a partir de residuos, las industrias reducen su huella ambiental y los agricultores aprovechan desechos orgánicos para energía y fertilizantes, cerrando ciclos sostenibles**. Estas herramientas también permiten prever problemas antes de construir o modificar plantas, evitando costos y riesgos innecesarios.



CONCLUSIÓN

El modelo reducido ADM1-R4 permite entender cómo los digestores anaerobios **transforman** los residuos orgánicos en **energía renovable** de manera eficiente y sostenible. Las simulaciones muestran que es posible **optimizar** la producción de metano y mantener la estabilidad del sistema sin experimentar directamente con el digestor. Aprovechar los **residuos** que generamos a diario puede **convertirse en energía limpia y contribuir a un entorno más sostenible**. Cada acción cuenta: **menos contaminación y más energía renovable están al alcance de todos.**

REFERENCIAS

1. Angenent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Wrenn, B. A., & Domíguez-Espinosa, R. (2004). Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 22, Issue 9, pp. 477–485). https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.07.001
2. Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V, Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*.
3. Flores-Estrella, R., Quiroz, G., Mendez-Acosta, H. O., & Femat, R. (2013). H ∞ control of anaerobic digester for winery industry wastewater treatment. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *52*(7), 2625–2632. https://doi.org/10.1021/ie302233t
4. Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (Tchobanoglous George, Stensel H. David, Tsuchihashi Ryujiro, Burton Franklin, Abu-Orf Mohammad, Bowden Gregory, & Pfrang William, Eds.; 5th ed.). McGraw Hill Education.
5. Weinrich, S., & Nelles, M. (2021). Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) – Model development and stoichiometric analysis. *Bioresource Technology*, *333*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125124

Fronteras en la superficie del océano detectadas con algoritmos de procesamiento de imágenes

Amelia Sánchez-Pérez[1], Emmanuel Romero[2], Laura Sánchez-Velasco[1]
[1]Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN). Departamento de Oceanología. La Paz, B.C.S., México.
[2] Universidad Autónoma de Baja California Sur. Departamento Académico de Sistemas Computacionales. La Paz, B.C.S., México.

Introducción

Los frentes oceánicos son fronteras donde convergen aguas con propiedades diferentes (p.ej., temperatura, salinidad) [1,2]

Funcionan como "autopistas biológicas" que concentran nutrientes y atraen vida marina [3], pero… **¡a simple vista no se pueden ver!**

Con datos satelitales y algoritmos de procesamiento digital de imágenes, podemos resaltar estos límites entre aguas [4,5], de manera similar a como un celular detecta rostros en una foto. Así la tecnología nos permite revelar las fronteras ocultas del océano

Del satélite al mapa: detección de frentes

Satélites

1. Los satélites miden la radiación proveniente del océano

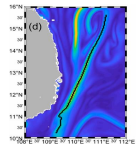
Computadoras y leyes de la física

2. La radiación se convierte en datos de temperatura superficial del mar

Procesamiento de imágenes

3. Uso de procesamiento digital de imágenes para detectar bordes

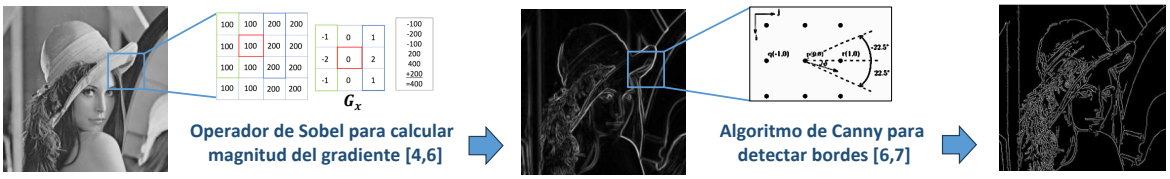
Resultado



4. Mapas de frentes oceánicos resaltando diferencias de temperatura

¿Sabías que …?

Tanto una imagen satelital como una foto de tu rostro pueden representarse como matrices numéricas que permiten a los algoritmos de procesamiento de imágenes identificar contornos. Estos algoritmos que se usan para el reconocimiento facial o la aplicación de filtros en redes sociales, se adaptan en oceanografía para identificar frentes marinos invisibles al ojo humano.



Operador de Sobel para calcular magnitud del gradiente [4,6]

Algoritmo de Canny para detectar bordes [6,7]

Identificación de frentes térmicos utilizando algoritmos de detección de bordes

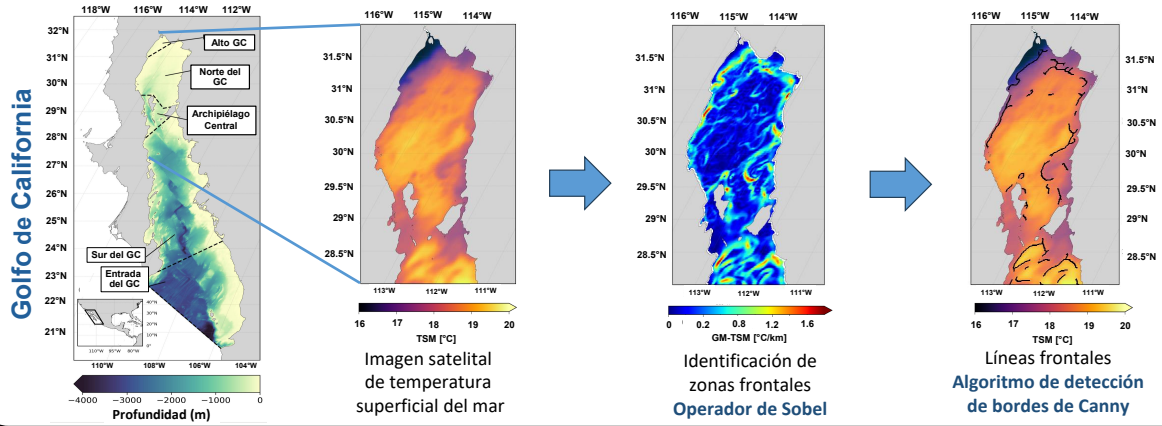


Imagen satelital de temperatura superficial del mar

Identificación de zonas frontales
Operador de Sobel

Líneas frontales
Algoritmo de detección de bordes de Canny

Impactos en el entorno

Pesca sustentable: los frentes indican zonas productivas, ayudando a pescar sin sobreexplotar

Cambio climático: su estudio revela cómo varían los océanos y sus efectos en ecosistemas y clima

Transferencia tecnológica: los algoritmos usados también se aplican en medicina (detección de tumores), agricultura (monitoreo de cultivos) y seguridad (detección de objetos en cámara)

Para saber más

Listening to Jupiter: Automatic classification of Jovian emissions

Sergio Mier Urbina*, Arturo Méndez Patiño*, Enrique Reyes A.*, Javier A. Rodríguez H.*, Marco Vinicio Chávez B.*, María del Carmen García R.*, Ernesto Aguilar Rodríguez**

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México

** Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México

Introduction

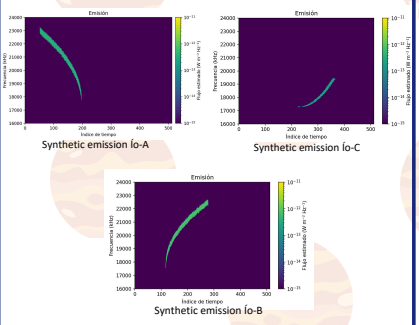
Jupiter, the largest planet in the solar system, emits powerful radio signals that can be detected from Earth. Some of these emissions, called Io-A, Io-B, and Io-C, are related to the interaction between Jupiter and its moon Io. For years, these signals have been classified manually by observing spectrograms, which is a slow process and depends on the interpretation of the individual analyzing them. This work proposes an automatic way to classify them using artificial intelligence, first simulating typical signals and training models capable of accurately recognizing them.

Main content

¿How are the signals we use generated?

To train an automatic system to classify Jupiter's emissions, we first need examples. Since there aren't enough real labeled images, we generated our own simulated signals using Python.

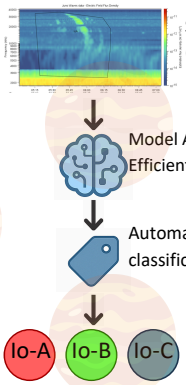
These images mimic the emissions known as Io-A, Io-B, and Io-C. Each class is represented by arcuate curves, similar to those actually observed from Earth.



¿How does automatic classification work?

To recognize the signals, we used artificial intelligence models that learn to identify patterns in images.

We trained two different models with the simulated data: one called EfficientNet-B0 and the other called ViT (Vision Transformer). These models were fed hundreds of examples so they could learn to distinguish between different types of emissions.

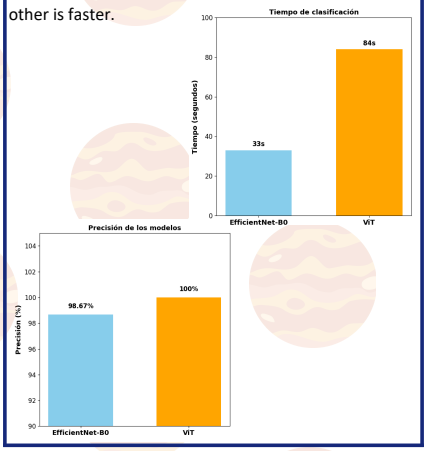


¿What results did we get?

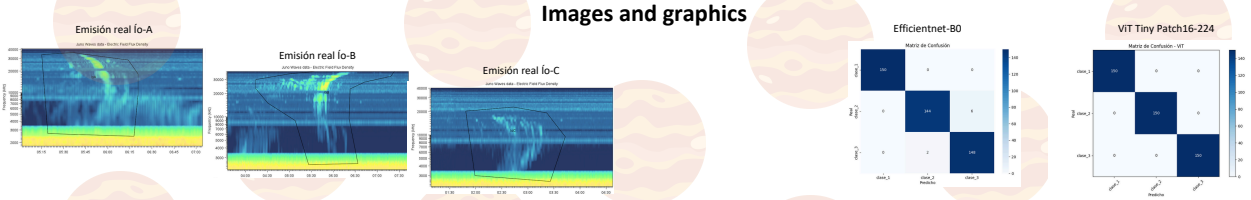
The ViT model achieved perfect accuracy, correctly classifying all signals.

The EfficientNet-B0 model also performed highly, albeit with minor confusion.

Both models proved to be very effective, but with different advantages: one is more accurate, and the other is faster.



Images and graphics



¿Did you know that ...?

Jupiter is so noisy in radio frequency that its emissions can be detected even from hundreds of millions of kilometers away.

Anyone can pick up Jupiter's radio signals from home using a homemade antenna and a computer, thanks to NASA's Radio JOVE project.
"This project allows students and enthusiasts to pick up real Jupiter emissions from home."

Conclusion or final message

Listening to Jupiter is no longer something reserved only for scientists. Today, thanks to accessible tools and artificial intelligence, it is possible to analyze these signals.

This work demonstrates that it is possible to automate the classification of Jupiter's emissions, which can save time, reduce subjectivity in the analysis, and open the door to new research, even in educational settings.

Science can be accessible, understandable, and exciting. All you need is to look at the sky... have an antenna and curiosity.

References "To learn more"

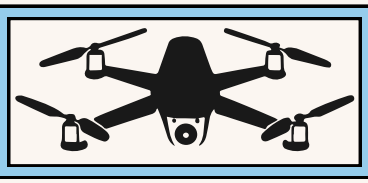
- NASA – Proyecto Radio JOVE
  https://radiojove.gsfc.nasa.gov
- Catálogo de emisiones de Júpiter (Juno/Waves – MASER)
  https://maser.lesia.obspm.fr
- Flagg, R. S. (2005). Listening to Jupiter (2ª ed.).
  Radio-Sky Publishing.

SISTEMA DE ACTIVACION MEDIANTE SENSORES INFRARROJOS DE DRON DE SEGURIDAD CON RECONOCIMIENTO FACIAL

Baqueiro Monforte Luis Adrian, Chab Pantoja Carlos Ivan, Garcia de la Cadena Ariadna Monserrat, Gutierrez Toache Dana Paola, Pech Pamplona Carmita de Jesus, Uicab Canul Pablo Itzamna.
Universidad Politecnica de Yucatan (UPY).

INTRODUCCIÓN.

El proyecto busca dar una respuesta a la creciente percepción de inseguridad en México y, específicamente, en la Península de Yucatán, donde la sensación de inseguridad ha aumentado significativamente. Este sistema autónomo y no invasivo ofrece una solución de seguridad preventiva y reactiva para propiedades de alto valor o vulnerables, reduciendo la dependencia exclusiva de personal humano.



1 **SISTEMA PREVENTIVO Y REACTIVO**
Detecta movimientos con sensores infrarrojos de forma preventiva. Al activarse, despliega un dron de forma reactiva para grabar evidencia.

2 **AUTONOMÍA TECNOLÓGICA**
El sistema opera de forma autónoma sin intervención humana, desde la detección inicial hasta el despliegue del dron y su regreso a la base de recarga.

3 **SOLUCIÓN COMPLEMENTARIA A LA SEGURIDAD HUMANA**
Este sistema complementa a los guardias de seguridad, liberándolos de tareas de vigilancia rutinarias para que se enfoquen en situaciones más críticas.

4 **ENFOQUE EN LA DETECCIÓN NO INVASIVA**
Utiliza sensores infrarrojos pasivos (PIR) para detectar calor y movimiento sin emitir radiación, garantizando una vigilancia efectiva y respetuosa de la privacidad.

5 **ESCALABILIDAD Y ACCESIBILIDAD**
El diseño del sistema permite su escalabilidad a diferentes propiedades y su adaptabilidad para integrar futuras tecnologías de inteligencia artificial.

6 **EVIDENCIA DE LA EFICIENCIA**
Al activarse, el dron se despliega y emite una alerta sonora a través de su actuador. Esto no solo disuade a posibles intrusos, sino que también notifica al personal de seguridad de una amenaza en tiempo real.

7 **EVIDENCIA DE LA EFICIENCIA**
El sistema cuenta con una cámara HuskyLens que no solo graba video, sino que también tiene la capacidad de reconocimiento facial, lo que permite documentar y aportar pruebas visuales de los eventos.

¿SABÍAS QUE?

La implementación de drones con tecnología de termografía en zonas industriales y corporativas en México ha logrado reducir los incidentes de seguridad críticos hasta en un 40% en algunas áreas, al permitir la detección temprana de anomalías y la supervisión de áreas peligrosas sin exponer al personal humano a riesgos laborales.

APLICACIONES EN LA VIDA COTIDIANA.

El sistema posee un amplio rango de aplicaciones prácticas que extienden su utilidad más allá de la seguridad industrial o corporativa. En primer lugar, es una herramienta poderosa para la vigilancia residencial y comunitaria. En el entorno de grandes propiedades, condominios o zonas rurales, el sensor puede detectar una intrusión en el perímetro mientras el dron se despliega automáticamente para filmar y documentar la amenaza. Esto elimina la necesidad de que los guardias realicen rondines constantes o arriesguen su integridad al investigar una alarma, ofreciendo una respuesta rápida y verificable que mejora la seguridad vecinal.

CONCLUSIÓN.

El proyecto representa una solución tecnológica robusta y oportuna ante el creciente desafío de la inseguridad. La viabilidad del sistema no solo se mide por su eficiencia técnica, sino también por su escalabilidad y adaptabilidad. Al utilizar componentes de código abierto como el ESP32 y módulos como el HuskyLens, el proyecto se posiciona como una alternativa de bajo costo y alto impacto frente a los sistemas de seguridad tradicionales. En última instancia, este proyecto es un claro ejemplo de cómo la integración inteligente de hardware simple (sensores de movimiento) y plataformas complejas (drones autónomos) puede traducirse en una mejora tangible en la seguridad perimetral y la disuasión delictiva, sentando las bases para futuros desarrollos que incorporen IA avanzada, como el reconocimiento facial.

PARA SABER MÁS.

- INEGI (2024). Encuesta Nacional de Victimización y Percepción sobre Seguridad Pública (ENVIPE) 2024.
- González Sacoto, D. P., Yarad Jácome, M. J., Llanes-Cedeño, E. A., & Muñoz-Proaño, R. S. (2024). Implementation of a facial recognition system in a low-cost drone.
- Gutiérrez Bravo, J. M. (2021). Desarrollo de un sistema de detección de movimiento mediante un sensor infrarrojo pasivo para implementación en robótica.
- Gobierno de México (2025). Vigilantes y guardias en establecimientos. Data México.

Smart-stop: La Parada De Autobús Que Te Devuelve Tu Tiempo

Tristan Adrián Tah Garma*, Angel Jose Cen Ek*, Jorge Guillermo Flores Reyes*, Carlos Manuel Ku Basto*, Edrei Asiel Manzanilla Carrillo*, Carlos Gabriel Orozco Chac*.
Universidad Politécnica de Yucatán

Introducción

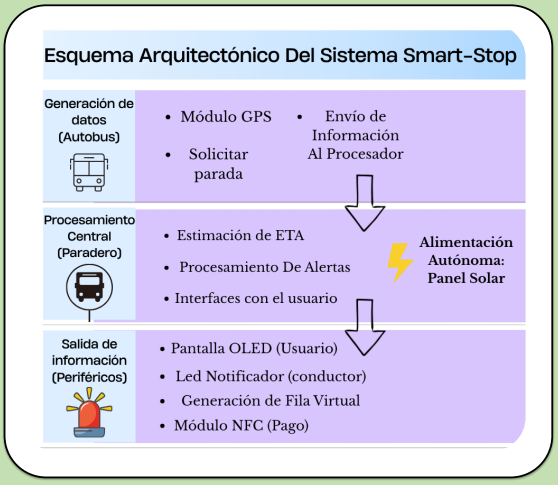
En Mérida, el 47% de la población usa transporte público todos los días. A pesar de los nuevos camiones "Va y Ven", las paradas siguen siendo un problema: se llenan de gente y generan estrés e incertidumbre, especialmente al tener que esperar bajo el calor extremo de la ciudad. La causa principal es la falta de información; llegamos a la parada "por si acaso" y esperamos más de lo necesario porque no sabemos cuándo llegará el autobús. Smart-Stop es nuestra solución para transformar esa espera.

¿Sabías que…?

A nivel mundial se ha visto que cuando una parada te dice en una pantalla cuántos minutos faltan para el siguiente autobús, la espera se siente mucho más corta. El simple hecho de saber qué va a pasar nos quita el estrés y nos devuelve el control de nuestro tiempo.

Contenido principal

¿Cómo funciona Smart-Stop?
Creamos un prototipo de parada inteligente que ataca la raíz del problema con tecnología accesible y sostenible.
Energía Solar: La parada se alimenta sola con un panel solar, haciéndola independiente y amigable con el medio ambiente.
Información en Tiempo Real: Usando un módulo GPS para rastrear los autobuses, la parada muestra en una pantalla OLED el tiempo exacto de llegada, eliminando la incertidumbre.
Recarga Fácil (NFC): Integra un punto para recargar la tarjeta "Va y Ven" sin complicaciones, directamente en la parada.
Aviso al Conductor (LEDs): Un sistema de luces LED le avisa al conductor que hay personas esperando, asegurando que el autobús se detenga para que puedan descender .



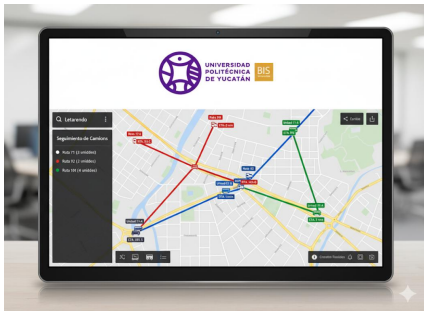
Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Smart-Stop podría mejorar directamente a:

- **Menos Estrés:** Al saber exactamente cuándo viene tu autobús, se acaba la ansiedad de esperar. Puedes planificar mejor tu tiempo.
- **Más Seguridad:** Una parada bien iluminada y organizada reduce la percepción de inseguridad y evita el caos al abordar.
- **Mayor Comodidad:** El diseño de la parada guía a las personas para formar filas ordenadas y ofrece un espacio más digno para la espera.
- **Un Sistema para Todos:** La solución está pensada para integrarse no solo con el "Va y Ven", sino con todas las rutas de transporte público, beneficiando a todos por igual.

Conclusión o mensaje final

Smart-Stop es más que una parada tecnológica; es un paso hacia un transporte público más humano, eficiente y seguro en Mérida. Nuestro prototipo demuestra que es posible transformar un espacio de espera caótico en un punto de encuentro inteligente que mejora la calidad de vida de los ciudadanos.



Referencias

IoT based smart bus stops. (2019, 1 junio). IEEE Conference Publication IEEE Xplore. https://ieeexplore.ieee.org/document/8906560

Peón, L. T., Kalisch, M. A. R., & Hernández, L. N. (2020, 1 noviembre). *Movilidad circular residencia a trabajo como elemento de la habitabilidad urbana. Caso de estudio: Mérida, Yucatán.* https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/7177

Edificación sostenible: una nueva forma de construir y vivir

Santiago Fabrizzio De Jesús Ocampo Vergara *, Jocelyn Damaris Sevilla Pinzón *, Daniela Hernández Castañeda *, ** Monica Borunda Pacheco
* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - SECIHTI.

Introducción

¿Alguna vez te has preguntado cómo sería vivir en una casa que cuide el planeta?
La edificación sostenible busca precisamente eso: construir de manera responsable, aprovechando los recursos naturales sin comprometer el bienestar de las futuras generaciones [1] .
México presenta un problema serio de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de los edificios. El reporte reciente "Emisiones de GEI de todos los países", elaborado por 19 investigadores asociados el Centro de Investigación Conjunta de la Comisión Europea, halló que las emanaciones de los inmuebles crecieron 26% entre 1990 y 2022, y 19% entre 2021 y 2022. El sector vivienda representa 16% del consumo total de energía y 26% del uso total de electricidad [2].
A diferencia de la construcción tradicional, que genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero y desechos a través de la fabricación de materiales como el cemento y el acero [3], la edificación sostenible integra **materiales reciclados** y **ecológicos**, **diseño inteligente** y **tecnologías eficientes**. Este enfoque reduce el impacto ambiental, optimiza el uso de recursos como agua y energía, promueve la salud y el bienestar de los ocupantes [4].

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

- **Ahorro energético y económico:** Los edificios con materiales eficientes y sistemas inteligentes consumen menos energía, ahorrando dinero y reduciendo la contaminación.
- **Bienestar y confort:** La ventilación y luz natural de calidad, materiales no tóxicos y diseño inteligente crean espacios saludables, cómodos y agradables.
- **Reducción de residuos y contaminación:** El uso de materiales reciclados y energías renovables disminuye la huella ambiental.

Para saber más

[1] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. Nairobi. Recuperado de: https://globalabc.org/sites/default/files/2024-11/global_status_report_buildings_construction_2023
[2] Godoy, E. (2024, enero 17). Las implicancias de la construcción insostenible en México. Climate Tracker. https://climatetrackerlatam.org/historias/mexico-soslaya-la-construccion-sostenible/
[3] Knezevich Yánez , C. A. ., Plúa Marcillo, A. J., Murillo Álava, P. F., & Salgado Granda, B. A. (2025). Uso de materiales reciclados en la construcción sostenible. Revista Social Fronteriza, 5(2), e–638. https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5(2)638
[4] Pinto, G. A. O., & Plata, G. O. (2010). Desarrollo sostenible en edificaciones. Revista UIS ingenierías, 9(1), 103-121.
[5] Osete, F. J. (2023, noviembre 14). Los 10 Mejores Materiales De Construccion Sostenible. Cemex Ventures. https://www.cemexventures.com/es/materiales-construccion-sostenible/
[6] PLB Distribucions. (S/f). Plb.cat. Recuperado el 4 de noviembre de 2025, de https://www.plb.cat/plb-noticias/15-tecnologias-para-construccion-verde/
[7] Ultracem (2025). Construcción Sostenible: El futuro de la construcción ecológica y eficiente. https://ultracem.co/construccion-sostenible-el-futuro-de-la-construccion-ecologica-y-eficiente-2/
[8] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015, 27 de noviembre). Edificación sustentable. Gobierno de México. Recuperado de https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/edificacion-sustentable

Contenido principal

El diseño es crucial en la construcción sostenible, ya que define cómo se integrarán las prácticas sostenibles en el proyecto, y entre otras cosas abarca:

- **Orientación y Ubicación:** Diseñar edificios con una orientación óptima que minimice las necesidades de calefacción, en época de frio, y refrigeración, en época de calor, así como, aprovechar la ventilación natural para reducir la necesidad de sistemas mecánicos.
- **Materiales Ecológicos:** Seleccionar materiales de construcción que tengan un bajo impacto ambiental, como el acero reciclado, el bambú, la madera reciclada, el corcho, el ladrillo de plástico, el hormigón reciclado, etc. [5].
- **Eficiencia Energética:** Incorporar el uso de técnicas y tecnologías que optimizan el rendimiento energético, tales como paneles solares fotovoltaicos, techos con vegetación, sistemas de energía geotérmica, captación de agua pluvial y aislantes que reduzcan la pérdida de calor, como la espuma de celulosa o la lana de oveja [6][7].

¿Sabías que…?

Los edificios sostenibles pueden ahorrar un 40% en consumo de agua, reducir hasta un 30% el uso de energía y las emisiones de gases contaminantes, y disminuir significativamente la generación de desechos [5].
El Gobierno de México promueve la edificación sostenible a través de normas como la NMX-AA-164-SCFI-2013, la implementación de programas de certificación (como el Certificado de Edificación Sustentable en la CDMX), el apoyo a proyectos de innovación como el clúster Vallejo-I, y el establecimiento de metas para reducir el impacto ambiental del sector [8].

Mensaje final

La edificación sostenible no solo transforma la forma de construir, sino también la manera de vivir: reduce el consumo de recursos, mejora la calidad de vida y protege nuestro entorno. Adoptar estos modelos significa construir un futuro más saludable, eficiente y equilibrado para todos.

ISBN: en trámite
ISSN: 2292-8338

5º CITCA

Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada

del 26 al 28 de noviembre, 2025

Cuernavaca, Morelos

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico