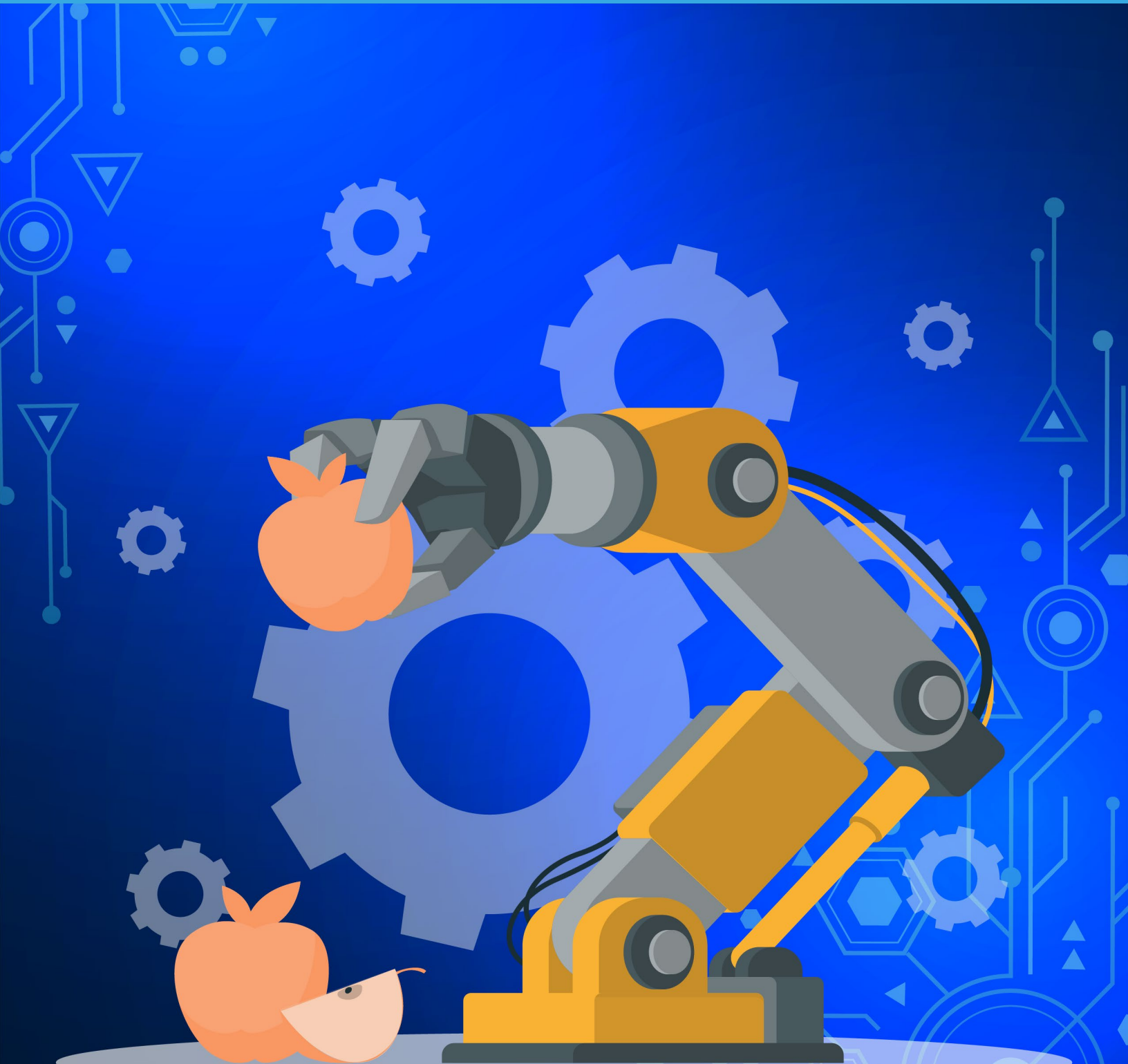


TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Enero-Junio 2023

Vol. 6 / Núm. 1

ISSN:2992-8338



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

VOLUMEN 6, NÚM. 1, ENERO-JUNIO 2023

ISSN:2992-8338

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Interior Internado Palmira s/n
C. P. 62490
Cuernavaca, Morelos, México.
<https://jcyta.cenidet.tecnm.mx/>
<http://cenidet.tecnm.mx>

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA, Volumen 6. Núm.1 enero-junio 2023, es una publicación semestral editada por el Tecnológico Nacional de México, Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, teléfono 5536002511 Ext. 65092, correo d_vinculacion05@tecnm.mx, a través del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México, Contacto: +(52)777 3627770, vin_cenidet@tecnm.mx, www.cenidet.tecnm.mx. Editor Responsable: M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: No. 04-2023-072614555600-102, ISSN:2992-8338, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, profesora-investigadora del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, Interior Internado Palmira s/n, Colonia Palmira, C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, México. Fecha de última modificación, 5 de junio de 2023.

Queda prohibida la reproducción parcial o total del contenido e imágenes de esta publicación en cualquier medio, sin previa autorización del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

DIRECTORIO

Mtro. Ramón Jiménez López
Director General del Tecnológico
Nacional de México (TecNM)

Dr. Arturo Ernesto Mares Gardea
Director del TecNM/Centro Nacional de
Investigación y Desarrollo Tecnológico
(TecNM/CENIDET)

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza.
Subdirector Académico del TecNM/
CENIDET

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Jefa del Departamento de Gestión
Tecnológica y Vinculación del TecNM/
CENIDET

Dra. Gloria Lilia Osario Gordillo
Jefa del Departamento de Desarrollo
Académico e Idiomas

Dra. María Yazmín Hernández Pérez
Jefa del Departamento de Ciencias
Computacionales

Dr. Jarniel García Morales
Jefe del Departamento de Ingeniería
Electrónica

Dr. Rafael Campos Amezcua
Jefe del Departamento de Ingeniería
Mecánica

Portada: Imagen recabada y tratada del
artículo 40, figura 10. Prototipo exoesqueleto
para miembros inferiores.

EDITORIAL

De la Convocatoria emitida por el TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) para la publicación y presentación de artículos en la X Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, se recibieron 103 trabajos en las áreas de Ciencias Computacionales, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Ingeniería, aceptando para su presentación de manera híbrida, presencial y/o virtual 74 trabajos que muestran la labor de 19 Institutos Tecnológicos federales y superiores como: CENIDET, Valle de Oaxaca, Cuautla, Orizaba, Lázaro Cárdenas, Milpa Alta, Matamoros, Chihuahua, Chihuahua II, Morelia, Tuxtla Gutiérrez, Zacatecas, Zacatepec, Coatzacoalcos, Chetumal, Sur de Nayarit, San Miguel el Grande y Tianguistenco; de 3 Instituto del Politécnico Nacional: Centro de Investigación en Computación, Escuela Superior de Cómputo y Escuela Superior de Física y Matemáticas, así como del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente y, de instituciones de Estados Unidos de Norteamérica y de Italia.

Cada artículo presentado en este Volumen 6, Núm. 1 Enero-Junio 2023, fue arbitrado por expertos profesores-investigadores en las áreas de la Convocatoria, que colaboran a nivel estatal, nacional e internacional en Centros e Institutos de Educación e Investigación, pertenecientes tanto al TecNM/CENIDET como de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, de la Universidad del Mar, de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, de la Universidad de Papaloapan, Universidad de Sonora, de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, de la Universidad de Veracruz, de la Universidad de Medellín en Colombia, del Colegio Científicos de Datos, del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, de IBM-México Software Lab, campus Guadalajara, del Banco Santander Sr-CoE, de IBM Guadalajara, de Rappi y de SSI/SHÄFER y, de Institutos Tecnológicos de Nuevo León, Irapuato, Morelia, Lerma, Tlalnepantla, Saltillo, Tuxtla Gutiérrez, Zacatepec y del Llano.

Agradecemos el trabajo realizado por los editores generales de los artículos Blanca Dina Valenzuela, María Yasmín Hernández Pérez y Nimrod González Franco. Así como a los editores asociados Ciencias de la Computación René Santaolaya Salgado y Javier Ortíz Hernández. Del área de Ingeniería Electrónica Jaime Eugenio Arau Roffiel y Ricardo Fabricio Escobar Jiménez; de Ingeniería Mecánica, José Jassón Flores Prieto y Roger Alejandro Cundapí Arroyo y de Ciencias de la Ingeniería, Rodolfo Amalio Vargas Méndez y Rosa Olivia Maquinay.

El Volumen 6, Núm. 1 Enero-Junio 2023 a través de los artículos científicos comunica los resultados de investigaciones e ideas de manera clara, concisa y fidedigna, de cada una de las cuatro áreas que conforman este ejemplar.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino

Editora

Revista Académica Tecnología y Ciencia Aplicada del
TecNM/CENIDET

COMITÉ DE ARBITRAJE EXTERNO E INTERNO POR CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

Ingeniería Mecánica

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Dr. Jorge Colín Ocampo
Dr. José Jassón Flores Prieto
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Dra. Claudia Cortés García
Dr. Carlos Manuel Lara Barrios
Dr. Vladimir Reyes Herrera
Dr. Eladio Martínez Rayón

Ciencias de la Ingeniería

M.C. Nayeli del Milagro Hernández
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Jesús Arce Landa
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dr. Gerardo Vicente Guerrero
Dra. Alicia Martínez Rebollar

Comité de Arbitraje Externo

Ingeniería Mecánica

Dr. Irving Osiris Hernández
Universidad de Sonora

Dr. Erik Rosado Tamariz
CONACYT-CENIDET

Dra. Luisana Claudio Pachecano
CONACYT-CENIDET

Dr. Roger Alejandro Cundapí
CONACYT-CENIDET

Dr. José Fragoso Mandujano
Instituto Tecnológico de Tuxtla
Gutierrez

Dr. Armando Huicochea
Centro de Investigación en
Ingenierías y Ciencias Aplicadas de
la Universidad Autónoma del
Estado de Morelos

Dr. Edgar García Hernández
TecNM/Instituto Tecnológico de
Zacatepec

Dr. Ramón Tovar Olvera
Instituto de Energía Renovable
de la Universidad Nacional
Autónoma de México-UNAM

Ciencias de la Ingeniería

M.C. Elda Reyes Varela
TecNM campus Nuevo León

M.C. Carlos Enrique Montoya Nito
TecNM campus Irapuato

M.C. Obeth Hernández Díaz
TecNM campus Morelia

Dra. Elidee Luna Medina
TecNM campus Lerma

M.C. José Rafael Molina
TecNM campus Tlalnepantla

Dr. José Isidro Hernández
TecNM campus Nuevo León

Dr. Jonam Leonel Sánchez
TecNM campus Saltillo

M.C. Diana Gabriela García
TecNM campus CRODE Celaya

Ciencias de la Computación

Dr. Nimrod González Franco
Dr. Javier Ortiz Hernández
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dra. Olivia Graciela Frago Díaz
Dra. Andrea Magadan Salazar
Dr. René Santaolaya Salgado
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dra. María Yazmín Hernández Pérez
Dr. Dante Mújica Vargas
Dr. Juan Carlos Rojas Pérez
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dr. Juan Gabriel González Serna
Dr. Máximo López Sánchez
Dr. Raúl Pinto Elías

Ingeniería Electrónica

Dr. Abraham Claudio Sanchez
Dr. Carlos Astorga Zaragoza
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Enrique Quintero Marmol
Dr. José Francisco Gómez Aguilar
Dr. Gerardo V Guerrero Ramírez
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Isaac Canela Sánchez
Dr. Jesús Mina Antonio
Dra. Ma. Guadalupe López López
Dr. Manuel Adam Medina
Dr. Mario Ponce Silva
Dr. Miguel Ángel Franco Nava
Dra. Susana De León Aldaco
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez

Ciencias de la Computación

Dr. Fernando Pech May
Inst. Tec. Superior de los Ríos
Dr. Jorge Ochoa Somuano
Universidad del Mar
Dra. Mireya Tovar Vidal
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Dra. Adriana Mexicano Santoyo
TecNM/ Campus Cd. Victoria
Dra. Sergio Fabian Ruiz
Universidad del Papaloapan
Dr. Miguel Angel Hidalgo Reyes
Catedrático CONACyT
Dra. Maria Clara Gómez Álvarez
Universidad de Medellín
Dr. Ismael Solís Moreno
IBM-México Software Lab,
Campus Guadalajara

Dr. Efrén Menzura Montes
Universidad de Veracruz

M.C. Eduardo Lorenzo Nuñez
Banco Santander Sr-CoE

M.C. Juan Carlos Escamilla García
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

M.C Humberto Hernández García
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
Dr. Gustavo Calzada Orihuela
IBM -México Technology Campus Guadalajara
Dra. Silvana De Gyves
IBM -México Technology Campus Guadalajara
Dra. Gloria Piedad Gasca Hurtado
Universidad de Medellín
Dr. Francisco J. Álvarez Rodríguez
Universidad Autónoma de Aguascalientes
Dr. Osslan Vergara Villegas
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)
Dr. Ivan Castillo Zúñiga
TecNM/ El Llano (ITEL)

M.C. Nandi Eliseo Legorreta Ruiz
Rappi

M.C. Tomás Salmerón
Colegio Científico de Datos (COCID)

M.C. Juan Carlos Soto Orduño
SSI/ SÂFER

Ingeniería Electrónica

Dra. Adriana Del Carmen Téllez
TecNM/Instituto Tecnológico de Morelia

Dra. Betty Yolanda López Zapata
UP Chiapas

Dr. Cornelio Morales Morales
TecNm/Instituto Tecnológico de Chilpancingo

Dr. Felipe De Jesús Torres
Universidad de Guanajuato

Dr. Gabriel Calzada Lara
COLPOS/ San Luis Potosí

Dr. Gerardo Ortiz Torres
Universidad de Guadalajara

Dr. José Hugo Arellano Pérez
Centro Nacional de Metrología

Dr. Jose Pastor Rodriguez
TecNM/Instituto Tecnológico de Orizaba

Dr. Juan Aqui Tapia
OSRAM, México

Dra. Maria Eusebia Guerrero
TecNM/Instituto Tecnológico de Hermosillo

Dra. Peggy Alvarez Gutiérrez
TecNM/ Tuxtla Gutiérrez

Dr. Ricardo Lozoya Ponce
TecNM/Instituto Tecnológico de Chihuahua

Dr. José Alfredo Hernández
Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias Aplicadas/ UAEM

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Consejo editorial de la publicación

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Coeditor

Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Editores Asociados

Mtro. Víctor Josué Ruiz Martínez
Sitio Web

Dana Santamaría Riquelme
Diseño de Portada

Diana Laura Rodríguez Bustamante
Janithzou Santamaría Riquelme
María Guadalupe Soriano Alvear
Diseño Editorial

Comité Técnico de los Artículos de la 10ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dra. María Yasmín Hernández Pérez
Dr. Nimrod González Franco
Editores generales de los Artículos

Dr. René Santaolaya Salgado
Dr. Javier Ortíz Hernández
Editores Asociados
Ciencias Computacionales

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Editores Asociados
Ingeniería Electrónica

Dr. José Jassón Flores Prieto
M.C. Roger Alejandro Cundapí Arroyo
Editores Asociados
Ingeniería Mecánica

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
M.C.E. Rosa Olivia Maquinay
Editores Asociados
Ciencias de la Ingeniería

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dr. Nimrod González Franco
Administrador de la plataforma CMT3

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Ismael Nava Salazar
Página Web de la conferencia 10 JCyTA

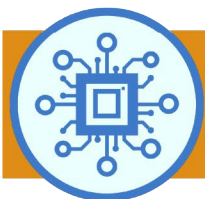


Desarrollo e instrumentacion de banco de pruebas para la evaluación de la calidad del agua mediante procesamiento digital de imagenes.	13
Desing and simulation of a microprocessor without interlocked pipeline stages implemented on FPGA.	19
Integracion de procesos de negocio con servicios web.	25
Implementación del proceso de análisis jerarquico mediante una aplicación Web aplicando la metodología ICONIX, para las mejores de toma de decisiones en el proceso de captación de personal.	31
Extracción de informacion de carátulas de hidrómetros usando visión artificial.	37
Propuesta de una línea base de prácticas de UX, que permitan fortalecer el proceso de Ingeniería de Software en proyectos que usan estrategias.	42
El impacto de la pandemia en la adquisición de habilidades y conocimientos técnicos: un análisis de las relaciones entre emociones, estrés y circunstancias cambiantes en el ITSZO enfocado a los alumnos de ISC.	45
Estimación de biomasa con termografía pulsada LOCK-IN: Aplicados en plantas de fresa.	49
QLERR (Quality Learning Resources Reader) un sistema para la evaluación de recursos de aprendizaje.	51
Comparación de los recursos de tiempos y memoria en la ejecución de una tarea de preprocesamiento de textos.	53
Metodología para complementar la evaluación de UX interpretando la carga de trabajo a partir de datos fisiológicos del usuario.	59
Reducción de la fragilidad del software legado originado por el acceso a datos compartidos.	61
Sistema DAQ mediante HoT con algoritmo de Machine Learning para seguimiento de procesos industriales.	68
Revisión de la literatura sobre técnicas de reducción de la dimensionalidad y su aplicación en datos de anticuerpos de SARS-CoV-2.	70
Modelo basado en redes neuronales artificiales para predecir la tasa de degradación fotocatalítica en aguas residuales.	77
Modelado conceptual del proceso de anotación genómica del segmento V.	79



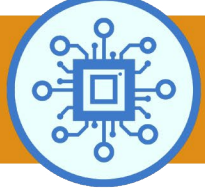
CIENCIAS COMPUTACIONALES

Propuesta de una aplicación móvil para la detección y seguimiento de medicamentos farmacéuticos.	87
Plataforma RESTful para el procesamiento de imágenes multiespectrales a través de dispositivos móviles.	89
Marco de servicios Web para el seguimiento de fugas de agua en tuberías de distribución.	95
Desarrollo de la programación de una mano robótica que realiza gestos en la lengua de señas mexicanas.	102
Representación del proceso de la anotación del segmento générico V con el modelo SATD.	104
Clasificación de la pose del cuerpo humano a través de puntos característicos.	107
Hacia una arquitectura de microservicios para automatizar procesos en la analítica de datos educativos.	114
Extracción y clasificación automática de opiniones relacionadas con el proceso de evaluación de usabilidad y de la UX mediante la técnica think-aloud en productos software.	120
Extracción y caracterización de señales de voz para la identificación de emociones.	126



INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Caracterización de una celda biofotovoltaica de pasto bermuda (Cynodon dactylon L. Pers) con variación del tamaño de celda.	134
Cosecha de energía piezoeléctrica con transmisión de potencia inalámbrica.	137
Diseño de una HMI basada en un equipo KINCO para el control de variables de procesos industriales.	139
Diseño e implementación de un sistema de identificación de figuras por visión artificial utilizando Visual Studio.	145
Impulsor con aislamiento para MOSFET e IGBT.	151



INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Diseño de un convertidor CD/CD resonante LLC con transformador.	153
Diseño e implementación de un modulo industrial para el manejo de sistemas de control multivariables utilizando PLC'S.	156
Métodos de Estimación de Impedancia de Red para Inversores Interconectados.	162
Esquema de detección de ataques en sistemas ciber-físicos utilizando banco de observadores.	164
Desarrollo de una plataforma de un videojuego para la rehabilitación pulmonar.	170
Esquema de observadores generalizados para el diagnóstico de fallas en sensores de una columna de destilación de tres platos.	176
Aplicación de una red neuronal inversa para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).	178
Estudio de una máquina síncrona en sistemas de almacenamiento por gravedad.	180
Desempeño en predicción de imágenes de nubosidad con redes neuronales.	182
Estrategia de modulación por vector espacial SPVPWM para un inversor trifásico con posibilidad de conexión a red.	188
Representación Takagi-Sugeno del modelo no lineal de un péndulo H2AT que representa a una persona con lesión en la médula espinal.	190
Esquema de diagnóstico de fallas para convertidores multinivel.	192

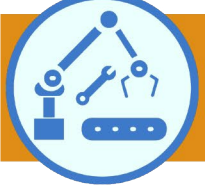


CIECIAS DE LA INGENIERÍA

Biodigestores para gestionar residuos biogénicos en zonas urbanas: Análisis numérico.	197
Análisis de revisiones sistemáticas sobre las tecnologías inteligentes utilizadas en las industrias de fabricación.	202
Aplicación de la mecánica de fluidos en el diseño de un sistema hidropónico.	208



Propuesta de un biodigestor anaerobio para la elaboración de composta orgánica.	214
Red de sensores intercomunicados usando tecnología IoT.	216
Diseño de una casa habitación con enfoque sustentable.	218
Extracción de azúcares reductores a partir de los residuos orgánicos generados durante la producción de mezcal.	221
Construcción y operación de una celda de combustible vegetal con planta ornamental para la producción de energía.	223
Reconocimiento de imágenes aplicado a sistema electromecánico para exploración espacial.	225
Evaluación de dos atrayentes para control de <i>Drosophila Suzukii</i> en el cultivo de frambuesa.	228
Propuesta de un Sistema Robótico Autónomo enfocado a la Asistencia Educativa.	223
Método bifuncional para la extracción de azúcares y el mejoramiento de propiedades adsorbentes del biomaterial.	236
Máquina regadora de fertilizante sólido de maíz.	240
Análisis de relación de innovación con enfoque frugal en los proyectos existentes del Tecnológico Nacional de México Campus Irapuato	244
Diseño de un prototipo generador de briquetas.	249
Medición de temperatura en tuberías de distribución de agua con tecnología óptica.	251
Análisis de los sensores distribuidos de fibra óptica con la técnica OTDR aplicados al Monitoreo de salud estructural para propuesta de sensor de desplazamiento.	256
Caracterización estructural de películas de ZnO obtenidas por depósito químico en fase vapor.	262
Análisis de los diferentes métodos para la elaboración de la bebida de frutas fermentadas con Kéfir.	265



Análisis de variables (QFD) en el proceso de fabricación de barras de poliuretano.	269
Efecto de un vidrio reflectivo sobre el desempeño térmico de una ventana bajo condiciones climáticas de Ciudad Juárez Chihuahua, México.	274
Estudio de la desalinización en un novedoso sistema de torre solar.	281
Diseño de un exoesqueleto mecánico de un miembro superior para el entrenamiento de movimientos en el boxeo.	287
Desarrollo de un exoesqueleto inferior pasivo.	293
Estudio teórico de las cargas pico en heliostatos debidas a la capa límite atmosférica utilizando la técnica CDRFG para la generación de turbulencia.	299
Diseño y manufactura de una máquina sandblasting de alta precisión para el manejo de materiales cerámicos, dirigida a Pymes.	305
Análisis computacional de cargas aerodinámicas en heliostatos concentradores.	310
Evaluación numérica de la absorción de energía de perfiles de base cuadrada bajo cargas de flexión.	316
Análisis de efecto de la posición del material de cambio de fase (PCM) sobre el desempeño térmico de un sistema de calentamiento pasivo de muro Trombe.	321
Eficiencia térmica en colectores solares planos con nanofluidos de índole óxido-metálico.	327
Linealización exacta para una clase de sistemas subactuados.	332
Voto de sensación térmica en edificios educativos en un clima tropical para temporada cálida y húmeda.	338



CIENCIAS COMPUTACIONALES

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Desarrollo e instrumentación de banco de pruebas para la evaluación de la calidad del agua mediante procesamiento digital de imágenes

A. E. De Paz Martínez* H. R. Hernández-De León*
J. A. Fragoso-Mandujano J. C. Martínez-Morgan
M. Pérez-Patricio E. N. Escobar-Gómez

* Tecnológico Nacional de México/ I.T Tuxtla Gutiérrez, / Posgrado
en Ciencias de la Ingeniería, Carretera Panamericana KM. 1080,
29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (e-mail:
M17270661@tuxtla.tecnm.mx).

Resumen

Utilizar sistemas de procesamiento de imágenes, posibilita el análisis y estudio de características pertenecientes a una imagen, estos sistemas son capaces de determinar la calidad del agua, a través de técnicas como la identificación de la presencia de contaminantes o variaciones físico-químicas dentro del medio. Estos sistemas proporcionan una alternativa eficiente de estudio, generan mediciones precisas y detalladas de los parámetros que intervienen en la calidad del agua. La instrumentación de un banco de pruebas para la recolección de datos es parte fundamental de las operaciones realizadas con procesamiento de imágenes. Las técnicas de adquisición de datos en el análisis de la calidad del agua, están basadas en la toma de imágenes de muestras de aguas residuales, estas son manipuladas dentro de entornos controlados para evitar alteraciones durante el estudio, como perturbaciones externas de luz, movimiento en la muestra, desenfoque de cámara. Este trabajo tiene como objetivo, enfatizar en los aspectos fundamentales de la instrumentación necesaria para el procesamiento y adquisición de imágenes, que faciliten la evaluación del estado en el que el agua se encuentra. Se abordan factores principales que intervienen en la adquisición de imágenes de muestras de agua, el procesamiento de las mismas, así como los equipos y herramientas utilizadas para el análisis y determinación de la calidad del agua.

Keywords: Calidad del agua, procesamiento de imágenes, banco de pruebas, instrumentación, parámetros.

1. INTRODUCCION

La calidad del agua está directamente vinculada a la salud humana y al cuidado del medio ambiente, siendo los sectores de producción industrial, agrícola, centros de tratamiento y distribución de agua para la población general los más afectados. En la lista principal de objetivos para el desarrollo sostenible, se indican de forma estricta las acciones para el cuidado del recurso natural (Nations, 2018). Por este motivo es crucial desarrollar metodologías que resulten eficientes al determinar la calidad de agua. Generalmente, se realizan procedimientos para el análisis químico, análisis microbiológico, monitoreo biológico, medición de parámetros físicos haciendo uso de sensores, además de operaciones de procesamiento de imágenes enfocadas en el estudio de la turbidez del agua (Gimenez et al., 2020).

Las mediciones de estos parámetros físicos dan como resultado valores cuantificados, los cuales representan un índice de clasificación de calidad del agua. Ya que estos estándares se ven recomendados para el análisis y estudio del medio, se establece una relación múltiple con las demás metodologías de medición, obteniendo valores óptimos para la determinación y clasificación de las clases de calidad del agua a las que el medio pertenezca (Uddin et al., 2022). El análisis de un solo parámetro no proporciona la información necesaria para obtener un dictamen correcto de calidad del agua. Debido a esto se realiza el estudio de *pH*, *DO*, *BOD*, *Temperatura*, *TDS*, *SS*, *Turbidez*, *FC* (Zhu et al., 2022). Una alternativa para realizar el análisis de calidad del agua es la implementación de técnicas de procesamiento de imágenes orientadas al aprendizaje automático. El campo de visión por

computadora es amplio y puede abarcar operaciones con un alto rendimiento y eficiencia al momento de analizar imágenes, logrando detectar objetos (Ren et al., 2016), o realizar una segmentación de imágenes (Fu et al., 2019). Estas metodologías permiten obtener datos relevantes que por lo general, son ignorados en otros estudios. El procesamiento de imágenes, específicamente en muestras de agua, posibilita la detección y cuantificación de contaminantes, tales como plásticos, metales pesados, y otros factores de riesgo visibles. Es por este motivo que se considera una técnica prometedora que se utiliza en mayor medida para complementar y mejorar otras técnicas de evaluación de la calidad del agua (Chen et al., 2020). El procesamiento de imágenes requiere de una instrumentación adecuada, que cuente con elementos capaces de analizar una cantidad relativamente grande de muestras, en un espacio controlado bajo condiciones óptimas para realizar la captura de imágenes de alta calidad con una resolución adecuada. También debe ser capaz de procesar y analizar estas imágenes para detectar y clasificar los contaminantes presentes en el agua (Lopez-Betancur et al., 2022). Es importante destacar que se requieren de diversos elementos electrónicos para la adquisición de datos, de los cuales dependerá la manera en que la información sea procesada, como el equipo de cámara e iluminación, así como el contar con un intérprete para la adquisición de datos. Por este motivo, los estudios orientados en la determinación de la calidad del agua se logran mediante la implementación de técnicas de procesamiento de imágenes y adquisición de datos enfocadas en el análisis de parámetros químicos, físicos, biológicos e imágenes, que incidan en la evaluación de la calidad del agua (Banda and Kumarasamy, 2020). La elaboración de un banco de pruebas para procesamiento de imágenes de muestras de agua, facilita la obtención de mediciones de manera precisa y reproducible. Esto mejora la confiabilidad de los resultados, lo que resulta útil en la detección temprana de contaminación y el monitoreo de la calidad del agua.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Para determinar un índice de calidad de agua, se suelen utilizar distintos enfoques. Existen diversos trabajos relacionados con el desarrollo y la instrumentación de bancos de pruebas para el procesamiento de imágenes, centrados en las características cuantificables. Para el tratamiento de productos deshidratados se destaca el uso de un banco de pruebas para la aplicación de termografía pulsada, analizando factores, como iluminación, calibración de la cámara térmica, espacio de manipulación de muestras y un controlador interprete (Fragoso et al., 2019). También se han desarrollado bancos de pruebas considerados "portátiles", que utilizan un contenedor en donde se encuentran incorporados los componentes necesarios para su funcionamiento, como fuente de iluminación, recipiente con muestra de agua, además de la captura de imágenes utilizando la cámara de un dispositivo móvil (Gimenez et al., 2021). Es posible utilizar un banco de pruebas para la medición de turbidez en el agua realizando la

toma de las imágenes con una cámara de teléfono de baja resolución, considerando técnicas que implican el uso lámparas RGB, con una tasa de flujo de energía radiante de $0,852 \text{ mW/cm}^2$ (Lopez-Betancur et al., 2022), destacando que al utilizar este componente, no se aprovecha al máximo el espectro de onda producido por una lámpara de luz blanca. De igual manera, se utilizan bancos de pruebas para determinar la turbidez en el agua, basadas en la toma de imágenes desde un ángulo frontal con iluminación infrarroja en un rango de 800 nm (Mullins et al., 2018). Esto genera mayor complejidad en la adquisición de imágenes, debido a que al analizar muestras de aguas residuales, no es posible identificar en su totalidad las partículas en suspensión si el agua "no llegase a tener coloración". Adicionalmente se debe realizar un ajuste de intensidad luminosa para la lámpara empleada. El ajuste de los factores de iluminación en ciertos trabajos implica contar con un controlador para el obturador de la cámara, que permita mantener una distribución uniforme de la turbidez de la muestra, obteniendo un promedio de la intensidad luminosa adecuada para el estudio (Liu et al., 2018), lo cual facilita la captura de las imágenes. La instrumentación de un banco de pruebas para el procesamiento de imágenes facilita la determinación de las características relevantes durante el análisis del agua. En la metodología aplicada, se consideran las principales problemáticas analizadas en diversos trabajos, proponiendo una configuración ideal ante factores no favorables en el estudio de agua, como el manejo de reflejos, mala calidad de imagen, temperaturas altas y manipulación de muestras.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El arreglo experimental aborda las operaciones del procesamiento de imágenes, tomando en cuenta aspectos de iluminación, calibración de cámara, ajuste de entorno, y la adquisición de datos para la construcción del banco de pruebas.

3.1 Objetivo del banco de pruebas

El banco de pruebas con la instrumentación electrónica adecuada permite el estudio de agua y como esta se ve alterada por factores y/o contaminantes. Las imágenes obtenidas indican una relación con los parámetros físicos medibles que determinan la calidad del agua como *pH*, *Temperatura*, *TDS* (Zhu et al., 2022), visualizando en una imagen 2D, aspectos como la coloración, textura, profundidad y densidad de objetos. Al identificar sedimentos de materia orgánica en una imagen, es posible realizar un análisis de la cantidad de turbidez en el agua.

3.2 Selección de los equipos y componentes

Para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes se debe contar con la correcta instrumentación electrónica. Es importante considerar la cantidad de datos a procesar, ya que existen microcomputadoras que facilitan la

obtención y procesamiento de los datos. Hacer uso de una tarjeta Raspberry Pi, resulta eficaz por velocidad de procesamiento mediante el uso de lenguaje Python, especializado para el tratamiento de imágenes (Marot and Bourennane, 2017). El módulo Raspberry Pi 4 destaca por la cantidad de almacenamiento y la velocidad de reloj de su procesador (Tabla 1).

Tabla 1. Velocidad de procesamiento Raspberry Pi.

Raspberry	Procesador	Velocidad Reloj	Núcleos/RAM
4B	BCM2711	1.5 GHz	4/ 2 GB
3B+	BCM2837B0	1.4 GHz	4/ 1 GB

El proceso requiere de múltiples fases, desde la adquisición de las imágenes, hasta el ajuste y calibración de las cámaras, por ello es importante conocer la resolución de la cámara a utilizar y el número de fotogramas por segundo (fps) a procesar (Tabla. 2).

Tabla 2. Relación fps - resolución de cámara.

Resolución de imagen	Velocidad de fotogramas
640x480	90 FPS
1280x720	60 FPS
1920x1080	30 FPS
3280x2464	15 FPS

La adquisición de datos y la selección de equipo fotográfico, son fundamentales para el desarrollo del banco de pruebas. Para que el arreglo experimental se encuentre en un ambiente totalmente controlado, se debe contar con la iluminación correcta, que se adecue a las muestras de agua. Existe un criterio basado en la determinación de la cantidad de la luz, que se considera necesario al efectuar el procedimiento de análisis de sustancias. La ley de Beer-Lambert (Ecuación 1), establece que la intensidad de la luz que atraviesa un medio, disminuye exponencialmente a medida que se incrementa la cantidad de material presente en el mismo medio (Baker et al., 2014).

$$A = \epsilon \cdot l \cdot c$$

(1)

En donde A es la absorbancia de la muestra, ϵ es el coeficiente de absorción molar, l es la distancia que la luz recorre en la muestra y c es la concentración que la muestra contiene. Teniendo calculada la cantidad de luz que se debe utilizar en el banco de prueba, se ajusta el sistema de estudio a algún tipo de iluminación que proporcione la cantidad de luz necesaria. Este análisis permite escoger iluminación adaptable, siendo el caso de los sistemas de luz comerciales con diferentes cantidades de lx que se adaptan al banco de pruebas (Fig. 1).



Figura 1. Tipos de iluminación para banco de pruebas.

De esta forma, la eficiencia del arreglo experimental del banco de pruebas, se verá reflejada en la adquisición y procesamiento de imágenes de cada muestra de agua, según el ajuste y calibración realizada (Fig. 2).

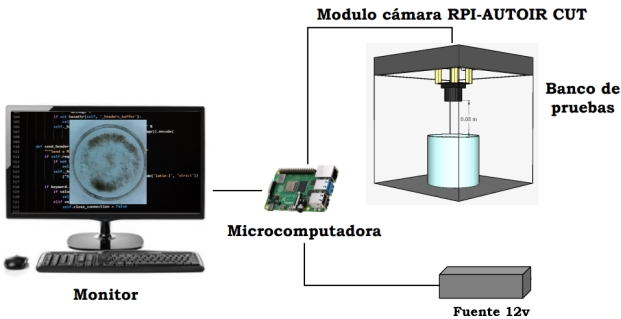


Figura 2. Arreglo experimental para el banco de pruebas.

3.3 Diseño y construcción del banco de pruebas

La simetría del banco de pruebas es importante, ya que debe ser accesible al momento de manipular muestras, debido a que se ingresarán dentro del banco de pruebas para su procesamiento. Se deben tener en cuenta las dimensiones del banco, control de la cantidad de luz que incide en el espacio, y la distancia de la cámara al objeto en donde se tenga contenido el medio (Fig. 3).

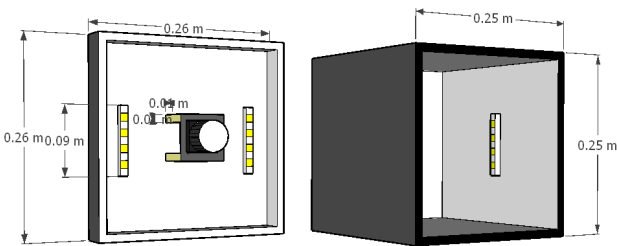


Figura 3. Modelo 3D del banco de pruebas para evaluación de calidad de agua.

La distancia entre el enfoque de la cámara y la muestra de agua dependerá de las dimensiones del banco de prueba, ya que entre más alejada se encuentre la cámara posiblemente se cuente con complicaciones de enfoque, además de la pérdida de características y el aumento en la incidencia de luz. Por lo que, se consideró una distancia de muestreo focal de 0.08 m.(Fig. 4) dentro del arreglo experimental. El banco de pruebas impreso en 3D se fabricó utilizando filamento PLA (ácido poliláctico) debido a su fácil manejo y bajo costo. El modelo se diseñó utilizando software de modelado 3D SolidWorks y se generó en una impresora 3D con una resolución de capa de 0,2 mm. El tamaño final del modelo impreso fue de 25 cm x 25 cm. Sobre la tapa del contenedor se

instaló un módulo de cámara RPI-AUTO-IR CUT, con una resolución de 1920×1080 píxeles (Fig. 5).

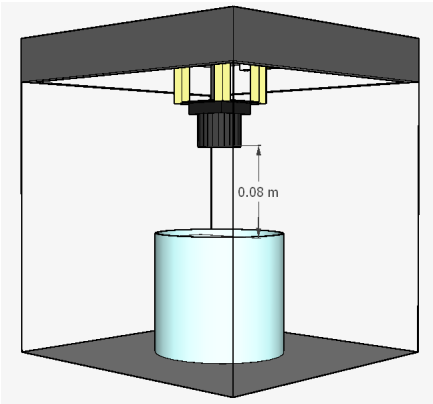


Figura 4. Distancia de enfoque óptima para procesar imágenes de las muestras de agua.

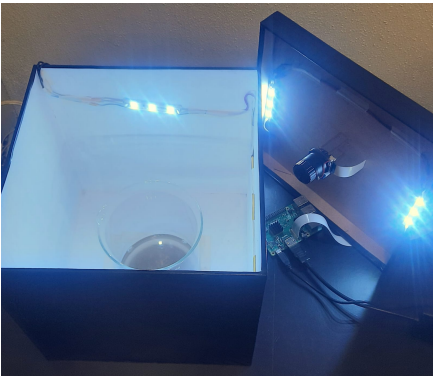


Figura 5. Construcción del banco de pruebas.
3.4 Obtención de datos con banco de pruebas.

El uso de un lenguaje interpretador como Python permite la obtención y manipulación de imágenes, ya que posibilita hacer uso de librerías como openCV, orientadas específicamente al procesamiento de imágenes. Es importante considerar que el uso de estas librerías requiere de la instalación dentro del sistema operativo Linux/ubuntu, siguiendo los pasos de la metodología de captura y procesamiento de las imágenes (Tabla. 3).

Tabla 3. Implementación de librería para Python.

Librería	Funciones	Nivel
OpenCV	Detección, segmentación, reconocimiento	5
scikit-image	Trasformaciones, filtros.	4
NumPy	Procedo numérico y matricial	3
Pillow	Manipulación básica	2

La metodología para la adquisición de las imágenes se encuentra orientada en la programación de Python, ya que, es posible hacer uso de librerías para el procesamiento o realizar la programación nativa. Estas técnicas de programación facilitan la adquisición de los datos a

procesar, a través de capturas de imágenes y obtención de videos en tiempo real (Fig. 6).

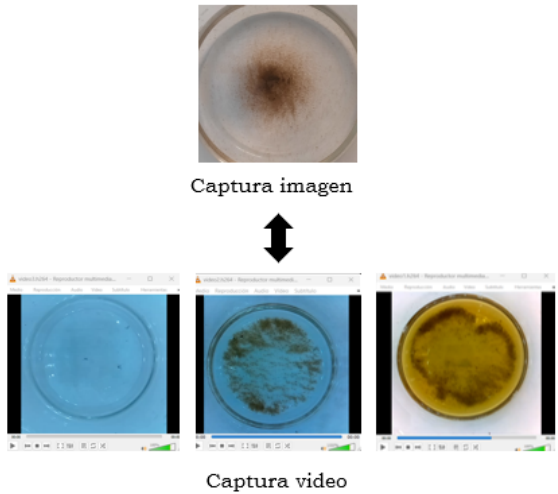


Figura 6. Obtención de imágenes implementando el banco de pruebas.

Uno de los aspectos más relevantes dentro del procesamiento de imágenes es el contar con un banco de imágenes, según la sea la investigación, ya que en muchos campos se aborda el entrenamiento de una red neuronal con imágenes procesadas, pues resulta complejo y tedioso el estar obteniendo imágenes de forma automática, por lo que es posible llevar a cabo la implementación de un algoritmo que indique la cantidad de ciclos necesarios para obtener la imagen, sin tomar en cuenta el tiempo (segundos) que la cámara necesita para la calibración automática. De esta forma es posible hacer uso de la programación para grabar un video, del cual, se obtendrán los frames, para ser analizados y procesados de forma completa en cada sección del video sin perder datos (Fig. 7).

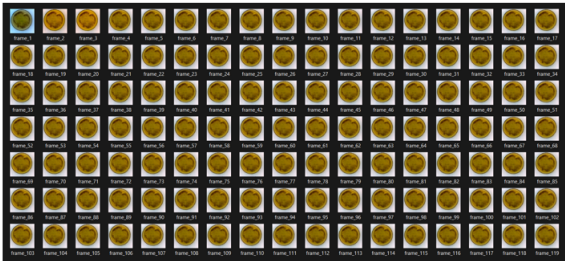


Figura 7. Generación del banco de datos.

3.5 Evaluación del rendimiento del banco de pruebas

El proceso para la determinación de la calidad del agua con la instrumentación del banco de pruebas, comienza con la selección de las muestras a estudiar, este análisis puede realizarse mediante el uso de una caja de petri o un vaso de precipitados. Se coloca una porción de la

muestra filtrada en el banco de pruebas y se ilumina con una fuente de luz. La imagen resultante se capturan utilizando una cámara y se procesa utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes (Fig. 8).

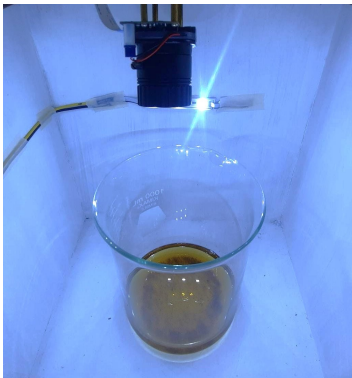


Figura 8. Obtención de imágenes para preprocesamiento.

Las operaciones de procesamiento de imágenes serán de utilidad para llevar a cabo el análisis de las muestras de agua, específicamente para establecer la relación del sedimento de materia orgánica y la turbidez del agua (Fig. 6). Efectuar estos procedimientos no sería posible si previamente no se realiza la correcta instrumentación electrónica necesaria para el funcionamiento del banco de pruebas. Ya que, a partir de estos elementos se deducen las distintas operaciones de procesamiento de imágenes. La importancia del banco de pruebas radica en las imágenes obtenidas, destacando para ello la correcta calibración de la cámara, además establecer correctamente los parámetros óptimos de iluminación, que se ajusten a las dimensiones del banco de pruebas. Por esta razón se presentan dos arreglos que se adaptaron de mejor forma a la calidad de las imágenes obtenidas (Tabla. 4).

Tabla 4. Características de calibración e iluminación.

Cámara	Resolución	FPS	Iluminación
RPI-AUTO-IR CUT	12 MP	60 FPS	500-1000 lux
Pi Camera V2	8 MP	30 FPS	100-500 lux

4. RESULTADOS

La instrumentación del banco de pruebas en el análisis de la calidad del agua, se define realizando test con diferentes cámaras, distintas resoluciones, cantidad de FPS, variaciones en la intensidad de luz, que permitan el análisis de contaminantes en el agua y factores que intervienen directamente en la turbidez del agua. Las pruebas contienen variaciones físicas y químicas, según sea el tipo de agua que se analice. Dentro del arreglo experimental se abarcan cinco niveles de clasificación de agua según su rango de ponderación obtenido, dentro el cálculo del índice de calidad del agua (Uddin et al., 2021). El arreglo experimental establece una relación entre la categoría y el número de muestras que se obtuvieron (Tabla. 5).

Tabla 5. Clasificación de agua

Categoría	Ponderación QWI	Muestras
Excelente	90-100	70
Buena	75-90	70
Excelente	50-75	70
Excelente	25-50	70
Excelente	5-25	70

Las imágenes obtenidas con el banco de pruebas, validan su utilidad, siendo posible realizar operaciones, como la binarización de una imagen de agua que se encuentre dentro de las categorías definidas, y a través de una siguiente operación con la imagen, obtener una región de interés para procesar los datos (Fig. 9).

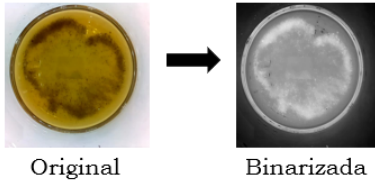


Figura 9. Binarización de una imagen de muestra de agua.

Este tipo de procesamiento se encuentra en paralelo con la umbralización de una imagen, se logra realizando la programación en Python para obtener resultados con los métodos de acercamiento, como binarización y *Threshhold* (Fig. 10).

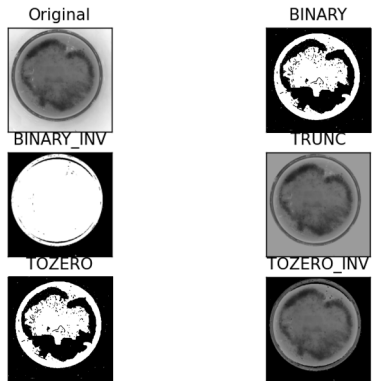


Figura 10. Acercamiento Threshhold en imágenes de agua sucia.

El resultado de estas imágenes se ve representado a través de su nivel de umbralización. Es posible registrar el umbral como un dato numérico, además de generar un histograma de la imagen procesada, donde se indica como se encuentran distribuidos los niveles de intensidad de color en los píxeles de la imagen y con base a ello realizar un análisis de la relación del espacio RGB de la imagen y la categoría de agua que se encuentre en relación con dichos canales de la imagen (Fig. 11).

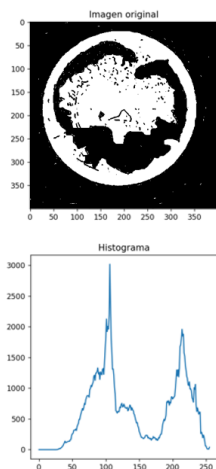


Figura 11. Histograma de datos de las imágenes de agua residual.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo e instrumentación de un banco de pruebas ofrece una alternativa eficiente y precisa para la evaluación de la calidad del agua mediante el procesamiento de imágenes. El implementar este tipo de sistemas, además de las técnicas de procesamiento de imágenes, permiten la identificación y cuantificación de diferentes contaminantes, la medición de la turbidez y distintos parámetros que intervienen en la calidad del agua. La implementación del banco de pruebas implica una serie de etapas, desde la definición de los objetivos hasta la validación del banco de pruebas. Cada una de estas etapas debe ser realizada cuidadosamente para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Al combinar hardware y software en el banco de pruebas damos paso a la automatización y a un nivel de eficacia en el proceso de análisis, lo que a su vez reduce el margen de error y garantiza un suministro de agua seguro y sostenible. Por lo tanto, es importante seguir investigando y desarrollando nuevas técnicas y metodologías para la determinación de la calidad del agua, promoviendo su uso a nivel mundial.

REFERENCIAS

Baker, W.B., Parthasarathy, A.B., Busch, D.R., Mesquita, R.C., Greenberg, J.H., and Yodh, A.G. (2014). Modified beer-lambert law for blood flow. *Biomed. Opt. Express*, 5(11), 4053–4075. doi:10.1364/BOE.5.004053.

Banda, T.D. and Kumarasamy, M. (2020). Application of multivariate statistical analysis in the development of a surrogate water quality index (wqi) for south african watersheds. *Water*, 12(6). doi:10.3390/w12061584.

Chen, J., Zhang, D., Yang, S., and Nanehkaran, Y.A. (2020). Intelligent monitoring method of water quality based on image processing and rvfl-gmdh model. *IET Image Processing*, 14(17), 4646–4656. doi: https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2020.0254.

Fragoso, A., Pérez, M., Ochoa, J., and Arcos, P. (2019). Construcción de un banco de pruebas de termografía

pulsada para productos deshidratados- review. *XXIV Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico*.

Fu, J., Liu, J., Tian, H., Li, Y., Bao, Y., Fang, Z., and Lu, H. (2019). Dual attention network for scene segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 3146–3154.

Gimenez, A.J., Medellín-Rodríguez, F.J., Contreras-Martinez, L.M., López-Romero, J.M., Sanchez, I.C., Villaseñor-Ortega, F., and Luna-Bárceñas, G. (2020). Turbidimetry by image degradation analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(10), 7574–7579. doi:10.1109/TIM.2020.2985902.

Gimenez, A.J., Medellín-Rodríguez, F.J., Contreras-Martinez, L.M., López-Romero, J.M., Sanchez, I.C., Villaseñor-Ortega, F., and Luna-Bárceñas, G. (2021). Turbidimetry by image degradation analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(10). doi:10.1109/TIM.2020.2985902.

Liu, Y., Chen, Y., and Fang, X. (2018). A review of turbidity detection based on computer vision. *IEEE Access*, 6, 60586–60604. doi:10.1109/ACCESS.2018.2875071.

Lopez-Betancur, D., Moreno, I., Guerrero-Mendez, C., Saucedo-Anaya, T., González, Efrén and Bautista-Capetillo, C., and González-Trinidad, J. (2022). Convolutional neural network for measurement of suspended solids and turbidity. *Applied Sciences*, 12(12). doi: 10.3390/app12126079.

Marot, J. and Bourennane, S. (2017). Raspberry pi for image processing education. In *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2364–2366. doi:10.23919/EUSIPCO.2017.8081633.

Mullins, D., D, C., L, H., E, J., E, C., and M., G. (2018). A novel image processing-based system for turbidity measurement in domestic and industrial wastewater. *Water Sci Technol*. doi:10.2166/wst.2018.030.

Nations, U. (2018). Water and sanitation, sustainable development. doi: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/.

Ren, S., He, K., Girshick, R., Zhang, X., and Sun, J. (2016). Object detection networks on convolutional feature maps. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 39(7), 1476–1481.

Uddin, M.G., Nash, S., and Olbert, A.I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. doi: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218.

Uddin, M.G., Nash, S., Rahman, A., and Olbert, A.I. (2022). A comprehensive method for improvement of water quality index (wqi) models for coastal water quality assessment. *Water Research*, 219, 118532. doi: https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118532.

Zhu, M., Wang, J., Yang, X., Zhang, Y., Zhang, L., Ren, H., Wu, B., and Ye, L. (2022). A review of the application of machine learning in water quality evaluation. *Eco-Environment & Health*.

Design and simulation of a microprocessor without interlocked pipeline stages implemented on FPGA

Manuel J. Cancino-Escobar*, Horacio I. Solís-Cisneros*,
Carlos A. Hernández-Gutiérrez*.

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana, km 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.*

Abstract: This work leverages the power of Verilog to design and simulate two MIPS microprocessors, allowing a comprehensive evaluation of their performance and functionality. The two 10-instruction RISC-based microarchitectures used in this work exemplify how microprocessor architecture can be optimized for specific applications. Different microarchitectures may be more suitable for different applications, and the choice can significantly impact microprocessor performance and power consumption. Implementing and simulating these two microarchitectures of the MIPS microprocessor have important applications in developing hardware testbeds. Test benches are essential for verifying the functionality and performance of hardware designs prior to manufacturing. By providing a detailed understanding of MIPS microprocessors and a testbed for evaluating digital circuits and systems, this work can help accelerate the development of new and innovative hardware designs.

Keywords: Microprocessor, MIPS, FPGAs, Verilog, RISC.

1. INTRODUCTION

Microprocessor development is the cornerstone of modern computer systems, and its improvement results in the benefits of technology, emphasizing the importance of understanding computer functionalities (Osman and Hashim, 2018a). Since the formation of new professionals is a requirement crucial to the world considering the current needs (Salazar and Birrer, 2020), Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages (MIPS) represents an essential first approach in computer architecture studies (Gross et al., 2016), (Harris and Harris, 2010; Patterson and Hennessy, 2000).

MIPS architecture is based on the Reduced Instructions Set Computer approach (RISC). Hence the instruction set allows a microprocessor with a reduced number of registers compared to other more complex architectures (Gualdrón Gamarra and Pinilla, 2015; Molina and Beltrán, n.d.). Despite MIPS limitations such as performance, complexity, memory limitations, and mismatching, it offers a big picture of computer architecture due to its simple but useful applications in different hardware development for education, accessible tools development, and relevance in industrial and research fields (Shukla and Johari, 2018), (Estrebou et al., 2021; Quiroga et al., n.d.). MIPS has been developed using hardware description languages (HDL) such as Verilog [10] and VHDL (Ritpurkar et al., 2014), mainly oriented to teaching (Gómez Luis, n.d.; Lazo et al., 2022), Internet of Things applications (Xiao et al., 2022), microarchitectures and simulation (Pérez et al., 2015). The

applicability of MIPS relies on segmentation in stages resulting in fast instructions with a few clock cycles (Aruna* et al., 2019; Osman and Hashim, 2018b). It is remarkable to mention that implementing this architecture in test benches allows exploring the effects of modification in the program memory, control unity, and data path. Research on designing a multicycle MIPS CPU implemented on FPGA presents fundamentals, implementation techniques, and verification methods to help students master the intricate process of FPGA hardware development (Liu et al., 2019). Another approach is focused on implementing three instructions in a single-cycle MIPS architecture using Verilog HDL and the Signal-Tap analysis tool of Quartus II software, thus testing the system as implemented in an Altera DE2 development board, in order to check the functionality of the microprocessor and the algorithm implemented in a state machine which controls the execution process of type R and type I instructions (Mustaphaa and Ahmadb, 2021).

Learning the MIPS architecture with an adjustable test bench is essential for computer and electronics-related careers. It helps to understand microprocessor operation in detail (Lazo et al., 2022; Leyva-Santes et al., 2019). In this work, two different MIPS architectures have been developed using Verilog and implemented on field-programmable gate array (FPGA). The multicycle and Single Cycle architectures were compared by generating a testbench that allows the exploration of the different stages and the impact of modifications on the microprocessor performance, analyzing the instructions execution time.

2. Materials and methods

The 32-bit-based microprocessor has three instruction formats for memory manipulation: R, J, and I.

2.1 Development of MIPS

A subset of instructions in Assembly is provided in order to simplify the description of the MIPS architecture, and it is described as follows:

- Memory Access instructions:
 - LW (load-word): load the content of a memory directory in a register.
 - SW (store-word): save the content of a register in a memory directory.
- Arithmetic and logic instructions:
 - ADD t0, t1, t2: adds the content in "t1", and "t2" and results is sent to the register "t0".
- Program Flow instructions:
 - J (Jump): go to a specific directory.
 - BEQ (Branch if equal): if the contents of two registers are identical, jump to a specific address.
- Instructions with immediate:
 - ADDI (Immediate addition (with overflow)): adds an immediate value to a register.

The instruction format of the MIPS architecture maintains a length of 32 bits. Inside the instruction format, three types of instructions are related to reading and writing to memory. The R-type format is used for arithmetic instructions such as addition and subtraction. Also, logical operations such as "and," "or," and "not." Figure 1 illustrates the type R instruction format(Smallwood, 2022).

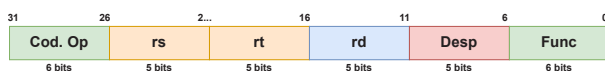


Figure 1. Type R Instruction Format.

The type I format (Fig. 2) is used to perform memory access operations, considering operations with immediate data and operations with conditional jumps.

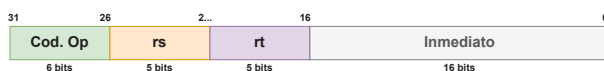


Figure 2. Type I Instruction Format.

The J-type instruction in MIPS serves the purpose of executing an unconditional jump to a designated memory location. The J instruction (Fig. 3) specifies the memory address to which the jump should occur, using a 26-bit destination field. It is important to note that the destination address is stored in the highest bits of the instruction, meaning that the jump can only be made to address multiples of 4 bytes.



Figure 3 Type J Instruction Format.

Where:

- Op: Operation code.
- Rs: First record operating source.
- Rt: Second record operating source.
- Rd: Target operand register, where the operation result is stored.
- Shamt: shift amount.
- Funct: This field selects the specific variant of the operation of the op field and is sometimes referred to as function code.

2.2 Proposed architectures

The main objective of designing the proposed microarchitectures is to have a clear picture of the operation of RISC microprocessors in the teaching area(Jamieson et al., 2022). For this reason, two MIPS microarchitectures were designed in Verilog hardware description language. The first single-cycle microarchitecture (Fig. 4) is based on the Harvard architecture with separate data and instruction memory access (Paliwal and Tripathy, 2020).

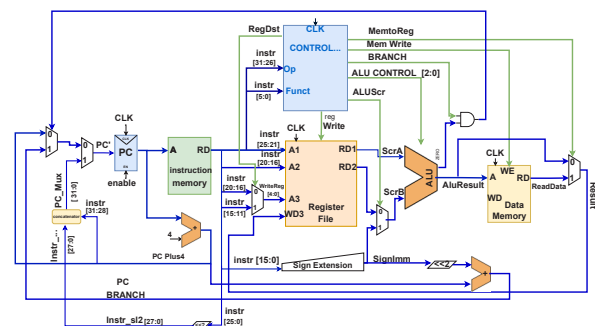


Figure 4. Designed single-cycle architecture

The main components in this microarchitecture are:

- **Program counter [PC]:** The program counter stores the current code memory address of the microprocessor. Additionally, an adder is required to increment the program counter by four so that it points to the next instruction address stored in the instruction memory.
- **Instruction Memory:** It is a ROM memory where the instructions that make up the program are stored.
- **Data Memory:** This is RAM storing program data or variables.
- **Register File:** A record bank where any record can be read or written.

In a single-cycle MIPS processor, each instruction is executed in a single clock cycle. This simplicity of design makes the processor easier to implement, but it also restricts the processing power and execution speed of more complicated instructions(Patra et al., 2020).In the case of a multicyle MIPS

processor (Fig. 5), the processor is divided into different stages (fetch, decode, execute, memory access, and write-back). Each of these phases is completed in a different clock cycle. As a result, greater flexibility is obtained, and more complex tasks can be performed than possible with a single-cycle processor.

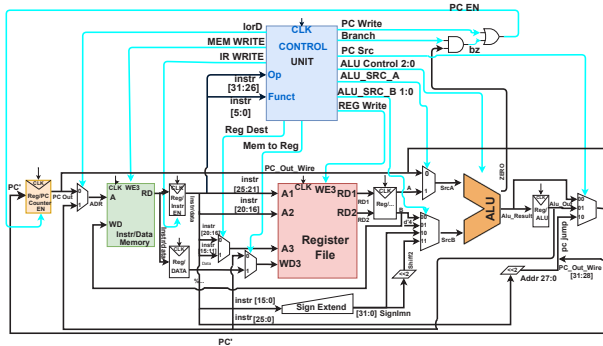


Figure 5. Designed multicycle architecture.

Among the notable differences with the single-cycle microarchitecture is using a single memory block. This memory stores the instructions and the volatile data that the microarchitecture retains. For this purpose, memory was divided into two blocks identified by the WE3 signal. This signal allows differentiating between reading and storing data in memory.

3. IMPLEMENTATION

Both microarchitectures were developed in Quartus II Prime Version 21.1.0 Lite Edition, a software tool for creating and programming FPGA and complex programmable logic devices (CPLD). This tool was used to describe the hardware that composes both architectures. The methodology used for the description was based on the modular design, which divides the architecture into small hardware modules with input and output ports. In this way, they become more manageable and allow testing and verification individually before being integrated into the final architecture. The compact and powerful DE10-Nano FPGA Altera Cyclone V 5CSEBA6U23I7NDK designed by Terasic Technologies was used to implement the architectures. Figure 6 represents the initial blocks of the single-cycle MIPS microarchitecture described in Verilog HDL and synthesized in a register transfer level (RTL) circuit using Quartus II software, as shown in Figure 7.

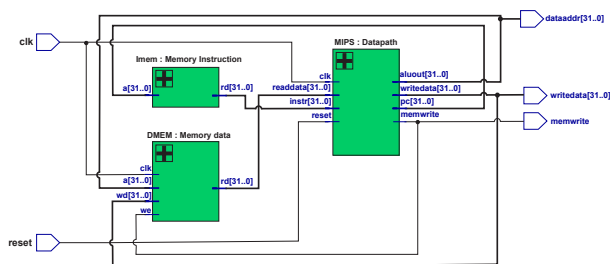


Figure 6. RTL single-loop MIPS architecture.

```
1 module top (clk, reset, writedata, dataadr, memwrite);
2   input clk, reset;
3   output [31:0] writedata, dataadr;
4   output memwrite;
5   wire [31:0] pc, instr, readdata;
6
7   mips mips
8   (
9     .clk(clk),
10    .reset(reset),
11    .pc(pc),
12    .instr(instr),
13    .memwrite(memwrite),
14    .aluout(dataadr),
15    .writedata(writedata),
16    .readdata(readdata)
17  );
18
19   imem imem
20   (
21     .a(pc[7:2]),
22     .rd(instr)
23   );
24
25   dmem
26   (
27     .clk(clk),
28     .we(memwrite),
29     .a(dataadr),
30     .wd(writedata),
31     .rd(readdata)
32   );
33
34   endmodule
35
```

Figure 7. Top design single-loop MIPS architecture in Verilog.

On the other hand, figure 8 shows the initial blocks corresponding to the multicycle microarchitecture that was also synthesized in RTL the MIPS multicycle microprocessor is described in two main blocks, the control unit and the data path, which are shown in the block diagram presented in figure 9 and its description in Verilog in figure 10.

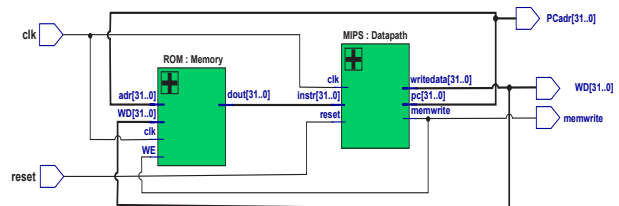


Figure 8. RTL multicycle MIPS architecture

Figure 9. RTL multicycle architecture datapath

```
1 module mips (clk, reset, instr, memwrite, PC_adr, WD);
2   input clk, reset;
3   input [31:0] instr;
4   output [31:0] WD;
5   output [31:0] PC_adr;
6   wire zero, IORD, memwrite, Irwrite;
7   wire Regdst, memtoReg, Regwrite, alusrcA, PCena;
8   wire [1:0] alusrcB, PCsrc;
9   wire [2:0] alucontrol;
10  wire [31:0] INSTR;
11
12  datapath datapath1
13  (
14    .clk(clk),
15    .reset(reset),
16    .instr(instr),
17    .IORD(IORD),
18    .Irwrite(Irwrite),
19    .Regdst(Regdst),
20    .memtoReg(memtoReg),
21    .Regwrite(Regwrite),
22    .alusrcA(alusrcA),
23    .alusrcB(alusrcB),
24    .PCena(PCena),
25    .PCsrc(PCsrc),
26    .aluControl(aluControl),
27    .PCAdr(PC_adr),
28    .WD(WD),
29    .INSTR(INSTR)
30  );
31
32  controller controller1
33  (
34    .clk(clk),
35    .reset(reset),
36    .instr(instr),
37    .IORD(IORD),
38    .Irwrite(Irwrite),
39    .Regdst(Regdst),
40    .memtoReg(memtoReg),
41    .Regwrite(Regwrite),
42    .alusrcA(alusrcA),
43    .alusrcB(alusrcB),
44    .PCena(PCena),
45    .PCsrc(PCsrc),
46    .aluControl(aluControl),
47    .PCAdr(PC_adr),
48    .WD(WD),
49    .INSTR(INSTR)
50  );
51
52  endmodule
53
54  ;
55
```

Figure 10. Datapath of the multicycle MIPS architecture in Verilog

4. RESULTS AND DISCUSSION

A testbench was performed to test the instructions of the microprocessor and the operation of the single-cycle microarchitecture (Harris and Harris, 2010). The first four instructions were:

- **addi \$2, \$0, 5**: initializes in register **\$2=5**, **\$2=** register where the result of the instruction will be stored, **\$0** = register **0** in which the constant data of zero is kept, and the number **5=** immediate or constant, the hexadecimal code of the instruction is: **20020005**
- **addi \$3, \$0, 12**: initializes in register **\$3 =12**, the hexadecimal code of the instruction is: **2003000c**
- **addi \$7, \$3, -9**: initializes in register **\$7 = 3**, the hexadecimal code of the instruction is: **2067fff7**.
- **Or \$4, \$7, \$2**: performs a logical **OR** operation on the integer data stored in registers **\$7** or **\$2** and stores the result in register **\$4**, the hexadecimal code of the instruction is: **00e22025**.

To test the correct functioning of both designed microarchitectures, a rom.dat file was created. The .dat files contain configuration information that is loaded into the FPGA device to set the desired logic function; for the particular case, this file will contain 18 instructions that compose the test bench with the ten instructions listed in Table 1. As shown in Figure 11, ROM memory is described in Verilog, and instructions are extracted from the rom.dat file in hexadecimal.

ModelSim is a software tool used to simulate digital circuits. ModelSim, compatible with several hardware description languages (HDL), such as VHDL, Verilog, and SystemVerilog, was used to simulate the microarchitectures. As shown in Figure 12, during the first clock cycle, the instruction memory is accessed to fetch the first instruction, decode it, and execute it. Therefore, the entire path performed in the datapath corresponds to a type I instruction, ra1 is the register of the first operand, ra2 is the destination register, and wd3 is the data resulting from the operation that will be stored in the register file.

```

1 // memory data file (do not edit the following line - required for mem load use)
2 // instance=testbench/dut/rom1/mem
3 // format=hex addressradix=h data radix=h version=1.0 wordsperline=1 noaddress
4 20020005 1 module rom(adr, wd, clk, we, dout);
5 2003000c 2 input clk, we;
6 2067fff7 3 input [31:0] adr, wd;
7 00e22025 4 output [31:0] dout;
8 00642824 5
9 00a42820 6 reg [31:0] mem [63:0];
10 10a7000a 7
11 0064202a 8 initial
12 10800001 9 begin
13 20050000 10 $readmemh("rom.dat", mem);
14 00e2202a 11 end
15 00853820 12
16 00e23822 13 always @(posedge clk)
17 ac670044 14 begin
18 8c020050 15 if (we)
19 08000011 16 mem[adr[31:2]+32] <= wd;
20 20020001 17 $writememh("rom.dat", mem, 0, 63);
21 ac020054 18 end
22 0 19 assign dout = mem[adr[31:2]];
23 0 20
24 0 21 endmodule
25 0 22
26 0 23
27 0 24
28 0 25

```

Figure 11. ROM memory of the multicyle architecture described in Verilog

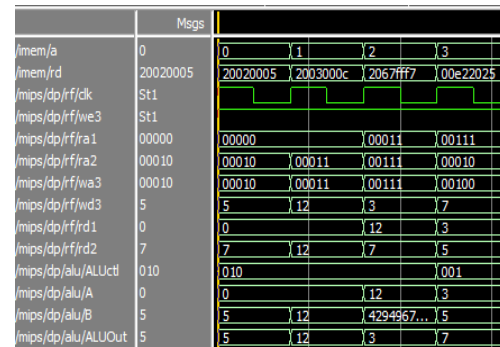


Figure 12. Simulation of the first four insertions in the single-cycle microarchitecture.

After obtaining satisfactory simulation results with ModelSim, both architectures were implemented on the DE10-nano development board. And then it was used the SignalTap II Logic Analyzer Editor tool to debug FPGA designs which is part of the Quartus II software package developed by Intel FPGA. SignalTap II Logic Analyzer Editor allows debugging of the microarchitecture design in real-time and at high speed. It is suitable to corroborate that the microprocessor works correctly in the implementation, as shown in Figure 13.

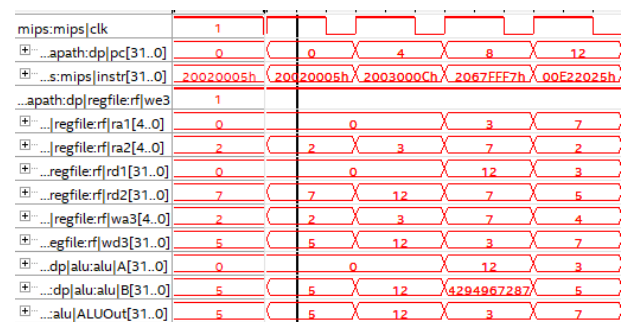


Figure 13. Results for the first four instructions implementing the single-cycle microprocessor on the DE10-nano board.

A multicyle processor was designed using the same method to create the single-cycle processor. Firstly, a data path was established, connecting the various elements of the microarchitecture to memory using combinatorial logic. For the correct operation of the multicyle microarchitecture, non-architectural state elements, specifically flip-flop registers, were incorporated to preserve the intermediate results between the different steps. The design of the controller was carried out, which generates other signals in each of the steps that make up the execution of an instruction, turning the processor into a finite state machine instead of a combinatorial logic machine (Figure 14).

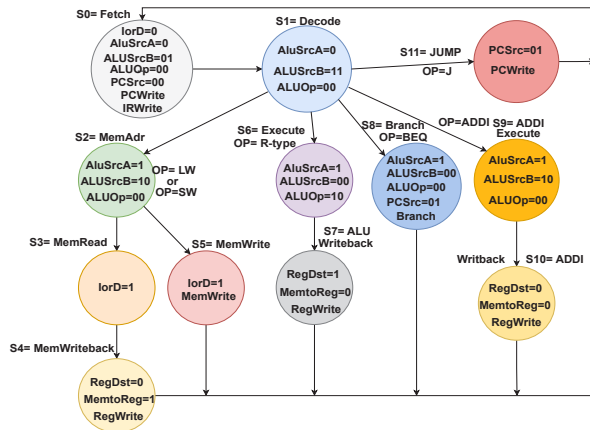


Figure 14. State machine logic of the multicyle microarchitecture.

Moreover, Figure 15 shows the RTL circuit corresponding to the instruction decoder generated by Quartus, where the state machine was generated.

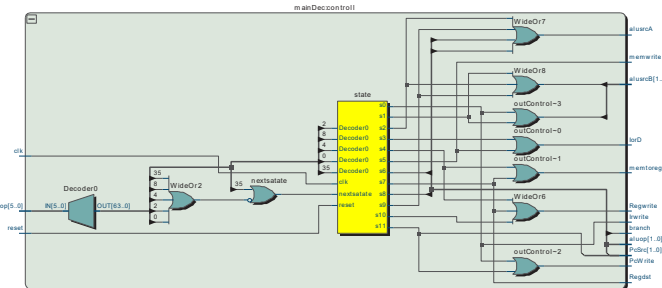


Figure 15. RTL circuit in Quartus multicyle microarchitecture state machine logic.

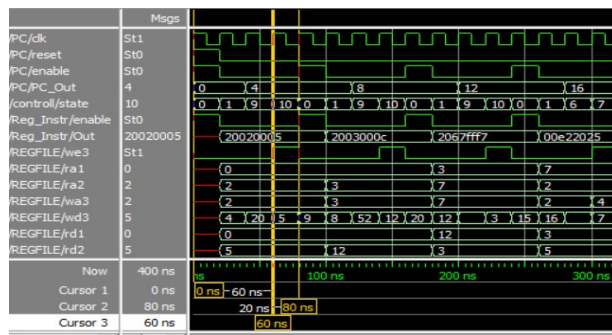


Figure 16. Simulation of the first four insertions in the multicyle microarchitecture.

The instructions of this microprocessor are executed in several steps, as shown in Figure 16. By the results obtained in the simulation using ModelSim software, the first four instructions are executed in 4 clock cycles, so non-architectural registers are inserted to store the results of each step. In this way, the ALU is reused several times, saving the cost of additional adders. In addition, instructions and data are stored in shared memory. Figures 17 and 18 show the results obtained by the Signal Tap Logic Analyzer software used for real-time debugging and

analysis of the implementation for the multicyle microarchitecture on the DE10-nano board.

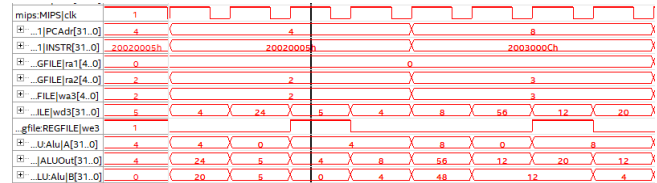


Figure 17. Results of the first two post-synthesis instructions on the DE10-nano board.

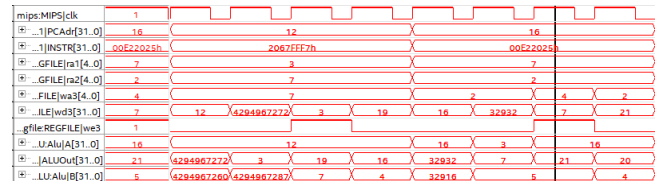


Figure 18. Results of the next two post-synthesis instructions on the DE10-nano plate.

Table 1. Instructions duration in clock cycles (CLK) from tested microarchitectures.

Instruction	Single-cycle microprocessor (Clock cycles)	Multicyle microprocessor (Clock cycles)
<i>ADDI Rd, Rs, Imm.</i>	1 CLK	4 CLK
<i>ADD Rd, Rs, Rt.</i>	1 CLK	4 CLK
<i>OR Rd, Rs, Rt.</i>	1 CLK	4 CLK
<i>AND Rd, Rs, Rt.</i>	1 CLK	4 CLK
<i>BEQ \$t0, \$t1, Dir.</i>	1 CLK	4 CLK
<i>SLT Rd, Rs, Rt.</i>	1 CLK	3 CLK
<i>SUB Rd, Rs, Rt.</i>	1 CLK	4 CLK
<i>SW Rs, Dir.</i>	1 CLK	4 CLK
<i>LW Rd, Dir.</i>	1 CLK	5 CLK
<i>J Dir.</i>	1 CLK	3 CLK

The response has been simulated using both ModelSim and the software for analysis debugging Signal Tap Logic Analyzer (Table 1). From the results in Table 1, in principle, it is remarkable that there is a lower execution time in the single-cycle microarchitecture compared to the multicyle microarchitecture for the ten proposed instructions. Compared to the results of the multicyle architecture, depending on the type of instruction will take different clock cycles; for example, the JUMP instruction takes three clock cycles versus the LW instruction, which takes five clock cycles.

5. CONCLUSIONS

This work has compared microarchitectures, highlighting the importance of well-known technology, such as MIPS, in different applications and opportunity areas. In summary, the results obtained in this first stage of microarchitecture development show shorter execution times in the single-cycle microarchitecture concerning the multicyle. However, it is well known that the multicyle architecture is more complex and is

used to improve efficiency compared to the single-cycle architecture by employing segmentation techniques. Research in multicycle architecture leads to improve processor performance, optimized power consumption, academic research, and engineering and computer science education. With this, a continuation in developing the multicycle microarchitecture is foreseen by adding hardware modules and segmenting hardware to expand the instruction set considering applications in compiler design, which results in a good understanding of the hardware design and computer architecture.

REFERENCES

- Aruna*, S., Naik, K.S., Madhusudan, D., Venkatesh, V., 2019. Implementation of 5-Stage 32-Bit Microprocessor Based Without Interlocked Pipelining Stages. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 9, 4557–4561.
- Estrebou, C.A., Camele, G., Quiroga, F.M., Villagarcía Wanza, H.A., 2021. Consolidación de conceptos de programación en lenguaje ensamblador a través de la creación de juegos y animaciones gráficas en el entorno de simulación winmips64, in: XVI Congreso de Tecnología En Educación & Educación En Tecnología-TE&ET 2021 (La Plata, 10 y 11 de Junio de 2021).
- Gómez Luis, A.I., 2016. Diseño e implementación en un FPGA de un microprocesador basado en la arquitectura MIPS de un solo ciclo.
- Gross, T.R., Jouppi, N.P., Hennessy, J.L., Przybylski, S., Rowen, C., 2016. A retrospective on "MIPS: a microprocessor architecture." *IEEE Computer Society* 36, 73–76.
- Gualdrón Gamarra, A., Pinilla, J.P., 2015. Plataforma para la emulación y reconfiguración de arquitecturas CISC Y RISC.
- Harris, D., Harris, S.L., 2010. Digital design and computer architecture. Morgan Kaufmann.
- Jamieson, P., Le, H., Martin, N., McGrew, T., Qian, Y., Schonauer, E., Ehret, A., Kinsy, M.A., 2022. Computer Engineering Education Experiences with RISC-V Architectures—From Computer Architecture to Microcontrollers. *Journal of Low Power Electronics and Applications* 12, 45.
- Lazo, C.R., Hernandez, C.A., Morales, C.R., García, G.M., Vargas, L.A.V., Salinas, M.A.R., 2022. Lagarto I—Una plataforma hardware/software de arquitectura de computadoras para la academia e investigación. *arXiv preprint arXiv:2202.13236*.
- Leyva-Santes, N.I., Pérez, I., Hernández-Calderón, C.A., Vallejo, E., Moretó, M., Beivide, R., Ramírez-Salinas, M.A., Villa-Vargas, L.A., 2019. Lagarto I RISC-V multi-core: Research challenges to build and integrate a network-on-chip, in: Supercomputing: 10th International Conference on Supercomputing in Mexico, ISUM 2019, Monterrey, Mexico, March 25–29, 2019, Revised Selected Papers 10. Springer, pp. 237–248.
- Liu, X., Fu, L., Rao, W., Lin, X., Liao, M., Shi, B., 2019. Multicycle CPU Design With FPGA for Teaching of Computer Organization Principle, in: 2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). IEEE, pp. 472–477.
- Molina, S.A.A., Beltrán, V.A.M., n.d. Supercomputación basada en la arquitectura ARM.
- Mustaphaa, S.U., Ahmadb, S.S., 2021. Enhancement of a Synthesized Single Cycle MIPS Processor on Altera DE2 FPGA Development Board.
- Osman, W.S., Hashim, S.M., 2018a. FPGA-Based Pipelined microprocessor, in: 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE). pp. 1–4.
- Osman, W.S., Hashim, S.M., 2018b. FPGA-Based Pipelined microprocessor, in: 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE). pp. 1–4.
- Paliwal, M., Tripathy, S., 2020. DIFFERENCE BETWEEN SINGLE-CYCLE AND MULTI CYCLE PROCESSOR. *Technology (Singap World Sci)* 11, 240–251.
- Patra, S., Kumar, S., Verma, S., Kumar, A., 2020. Design and Implementation of 32-bit MIPS-based RISC Processor, in: Advances in VLSI, Communication, and Signal Processing: Select Proceedings of VCAS 2018. Springer, pp. 747–757.
- Patterson, D.A., Hennessy, J.L., 2000. Estructura y diseño de computadores. Reverté.
- Pérez, M.R., Morales, M.D., Rodríguez, F.G., Barranco, A.L., Moreno, G.J., Balcells, A.C., 2015. Diseño e implementación de un simulador software basado en el procesador MIPS32. Enseñanza y aprendizaje de ingeniería de computadores: Revista de Experiencias Docentes en Ingeniería de Computadores 79–104.
- Quiroga, F., Berrondo, M.B., Estrebou, C., Camele, G., Franco, R., Waldo, H., Wanza, H.V., n.d. VonSim: Un simulador moderno para el aprendizaje de la programación en assembly, in: XVII Congreso de Tecnología En Educación & Educación En Tecnología (TE&ET 2022). p. 70.
- Ritpurkar, S.P., Thakare, M.N., Korde, G.D., 2014. Synthesis and Simulation of a 32Bit MIPS RISC Processor using VHDL, in: 2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR - 2014). pp. 1–6.
- Salazar, C., Birrer, M.B., 2020. Instrumentation and Extension of reduced, simulated Single Cycle MIPS architecture to improve Student Comprehension, in: 2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE). IEEE, pp. 1–5.
- Shukla, D., Johari, A., 2018. Study, Design and Analysis of 8 bit MIPS Processor using deep submicron CMOS C5 process, in: 2018 International Conference on Advanced Computation and Telecommunication (ICACAT). pp. 1–5.
- Smallwood, P., 2022. Building a MIPS Single Cycle Datapath—Part 1: R-type Instructions: Computer Architecture. POGIL Activity Clearinghouse 3.
- Xiao, S., Yang, M., Feng, X., Liu, X., Du, J., 2022. Design of Internet of Things Microprocessor Based on MIPS Instruction Set, in: 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). pp. 1694–1696.

Integración de procesos de negocio con servicios web

Edgar V. Ruiz P.*, Olivia G. Fragoso D.*,
Juan C. Rojas P.*, Blanca D. Valenzuela R.*

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México(e-mail: m21ce067@cenidet.tecnm.mx, olivia.fd@cenidet.tecnm.mx, juan.rp@cenidet.tecnm.mx, blanca.vr@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Integrating business processes through web services can be an effective way to unify and automate workflows within an organization. This solution facilitates communication between various systems by transferring data between different business processes. To document business processes, ISO 9001 is commonly used, while for software development specifically web services, ISO 12207 is often applied. Several modeling tools, such as use case diagrams, class diagrams, and deployment diagrams, are utilized for this purpose. Additionally, testing is incorporated to ensure the quality of the produced software.

Keywords: Web service, B2B, Business process integration, SOFOM, ISO12207, ISO9001.

1. INTRODUCCIÓN

Los servicios web se han vuelto una parte fundamental de la tecnología en la actualidad, y su uso en la integración de procesos de negocio se ha vuelto cada vez más popular. El objetivo de la integración de procesos es investigar las relaciones comerciales para producir clasificaciones y fusionar actividades en un sistema estandarizado [18]. La combinación de servicios web y la integración de procesos de negocio permite una mejor coordinación y comunicación entre departamentos y sistemas, lo que se traduce en una mayor productividad y una mejora en la calidad de los productos y servicios ofrecidos por la organización.

La operación de una Sociedad Financiera de Objeto Múltiple (SOFOM) es compleja debido a la gran cantidad de información y procesos involucrados. Se observa que existe una dependencia de herramientas tecnológicas por parte de las SOFOMES, las cuales no permiten el óptimo flujo de información, el problema se presenta cuando algunas herramientas tecnológicas o sistemas de información no pueden integrarse fácilmente y por lo tanto no generan la información requerida para la operación de la firma financiera.

1.1 Servicio web

Un servicio web es un sistema de software diseñado para admitir la interacción inter operable de máquina a máquina a través de una red. Tiene una interfaz descrita en un formato procesable por máquina. Otros sistemas interactúan con el servicio web de la manera prescrita por su descripción utilizando mensajes SOAP, que normalmente se transmiten mediante HTTP con una serialización XML junto con otros estándares relacionados con la web (World Wide Web Consortium, 2004).

1.2 SOFOM

Las Sociedades Financieras de Objeto Múltiple (SOFOMES) son sociedades anónimas que cuentan con un registro vigente ante la Comisión Nacional para la Protección y Defensa de los Usuarios de Servicios Financieros (Condusef), y cuyo objeto social principal es la realización habitual y profesional de una o más de las actividades de otorgamiento de crédito, arrendamiento financiero o factoraje financiero.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La Tabla 1 describe a los dominios que atienden los trabajos relacionados. En el presente trabajo el dominio de aplicación es el financiero atendiendo la problemática de integración de procesos de negocio utilizando servicios web.

Tabla 1. Dominio de aplicación de trabajos relacionados.

Dominio	Trabajos relacionados
Estadística [15]	1
Financiero [1], [2], [3], [8]	4
Gestión de aguas pluviales [5]	1
Gestión de procesos de negocio [10]	1
Integración de Procesos de negocio [11], [12], [13], [14], [17], [18], [19], [20], [21]	9
Optimización de procesos de negocio [9]	1
Seguridad informática [16], [4], [6]	3
Servicios Web [7]	1

Los artículos presentados en su conjunto se enfocan en buscar soluciones para mejorar la eficiencia, la integración y la seguridad de los procesos de negocio, especialmente en el

ámbito bancario y financiero. Se analizó que los trabajos relacionados proponen adoptar tecnologías, como la arquitectura orientada a servicios (SOA), la gestión de procesos empresariales (BPM), los servicios web y la colaboración en línea, como elementos clave para lograr estos objetivos.

Uno de los temas recurrentes en los artículos es el uso de marcos de trabajo para mejorar la eficiencia y la integración de los procesos empresariales. Por ejemplo, en el artículo [1], se presenta un marco integrado para sistemas contables bancarios de eChain, con el objetivo de mejorar la eficiencia y la transparencia de las operaciones bancarias. Del mismo modo, en el artículo [2], se presenta un marco para la adopción de SOA en bancos de economías en vías de desarrollo y desarrolladas, con el objetivo de mejorar la integración y la eficiencia de los servicios bancarios.

Además, varios artículos se centran en la implementación de tecnologías en aplicaciones móviles y web para mejorar la eficiencia de los procesos bancarios [3], mejorar en la toma de decisiones para la gestión de aguas pluviales usando servicios web [5]. La seguridad en línea y la protección de datos también son temas recurrentes en los trabajos relacionados. En el artículo [6], se presenta un marco para garantizar la seguridad de la arquitectura orientada a servicios en empresas. También se presentan diferentes enfoques para la evaluación y el benchmarking de la seguridad en línea de los servicios web.

En conclusión, los trabajos relacionados ofrecen soluciones prácticas y teóricas para mejorar la eficiencia, la integración y la seguridad de los procesos de negocio, especialmente en el sector bancario y financiero. La adopción de tecnologías emergentes y la colaboración en línea son elementos clave para lograr estos objetivos y los marcos de trabajo ofrecen un enfoque estructurado para la implementación de soluciones innovadoras.

Se ha encontrado en los trabajos relacionados que se usan servicios web para el funcionamiento de los procesos de negocio, un diferenciador clave en el trabajo aquí presentado es que se usan servicios web para integrar procesos de negocio mas no para el funcionamiento de los procesos de negocio, también otra característica de este trabajo es que se enfoca en la integración de procesos de negocio en el dominio de las SOFOMES, utilizando servicios web y MongoDB como base de datos. Para asegurar la calidad y eficiencia del proceso de desarrollo de software, se sigue la norma ISO 12207, y los procesos de negocio se documentan según la norma ISO 9001.

3. INTEGRACIÓN DE SERVICIOS WEB EN PROCESOS DE NEGOCIO

Para la realización de los servicios web de integración atendiendo la problemática de la interoperabilidad entre procesos de negocio, fue necesario documentar los procesos de negocio involucrados, en este caso procesos de negocio de una SOFOM, se utilizó la ISO9001 para documentar los procesos de negocio.

La metodología de solución que se siguió para este trabajo consistió en determinar cuáles son los procesos críticos para el éxito de la organización, después se documentó detalladamente cada proceso de negocio, incluyendo su propósito, objetivos, entradas, salidas, actividades y tareas asociadas, así como las reglas de negocio que rigen el proceso. También se identificó quiénes son los responsables de realizar cada actividad y tarea en el proceso, y cuáles son las interacciones entre los diferentes roles. Otra tarea realizada fue encontrar los indicadores clave de rendimiento para cada proceso de negocio, de modo que se puedan medir y monitorear los resultados.

Es importante señalar que el modelo de procesos de negocio presentado aquí es genérico, ya que las SOFOM son instituciones privadas que cuentan con procesos de negocio altamente específicos y personalizados.

Los procesos de negocio identificados en una SOFOM son los que se muestran en la Figura 1 en donde se puede observar en cada recuadro un proceso de negocio en una SOFOM.



Figura 1. Relación de procesos de negocio en una SOFOM.

Durante el proceso de desarrollo de software, se adoptó la ISO12207, se realizó la especificación de requerimientos como se muestra en la Tabla 2, los requerimientos documentados buscan atender la integración de los procesos de negocio mostrados en la Figura 1.

Tabla 2. Especificación de requerimientos.

N o.	Requerimientos de Software	
	ID	Descripción
1	R01	El proceso de análisis y calificación del crédito debe poder acceder a los datos de los prestatarios.
2	R02	El proceso de Alta en sistemas y formalización debe poder acceder a los datos de los prestatarios.
3	R03	El proceso de Alta en sistemas y formalización debe poder acceder a la evaluación de crédito.
4	R04	El responsable del proceso de Seguimiento de Crédito debe poder acceder a los datos de los prestatarios.
5	R05	El sistema deberá mostrar al usuario el contrato del prestatario para su consulta.
6	R06	El sistema deberá mostrar al usuario el contrato del proyecto para su consulta

7	R07	El responsable del proceso de Seguimiento de Crédito debe poder acceder a los datos del proyecto.
8	R08	El sistema deberá mostrar los indicadores del proceso “Alta en sistema y formalización” de acuerdo al anexo “Procesos de negocio Seguimiento de crédito SOFOM” documentación del proceso – indicadores.

A partir de los requerimientos se procedió a la etapa de análisis en donde se realizó un diagrama de casos de uso que se muestra en la Figura 2, el diagrama de caso de uso permite entender los requisitos y las expectativas de los usuarios finales, así como atender los requerimientos del software. Es importante mencionar que en el presente documento solo se detalla la información del caso de uso 1 debido a limitaciones de espacio.

El caso de uso 1 “Sincronización de datos de prestatario” pondrá a disposición los datos actualizados y disponibles acerca de los prestatarios, para utilizar esa información en otro proceso de negocio, este caso de uso atiende a los requerimientos R01, R02 y R08.

Se tiene como precondiciones para el caso de uso 1 que los datos del prestatario ya están registrados en el proceso de Solicitud de Crédito o el proceso de alta en sistema y formalización.

Los actores involucrados en el caso de uso 1 son los procesos de negocio solicitud de crédito, proceso de alta en sistema y formalización y el proceso de análisis y calificación del crédito.

Como escenario principal de éxito se tiene:

1. El encargado del proceso (ya sea Solicitud de Crédito, Alta en Sistema y Formalización o Análisis y Calificación del Crédito) solicita la información del prestatario.
2. El sistema establece conexión con la base de datos a través del caso de uso 2 y procede a leer los siguientes datos del prestatario
3. El sistema obtiene los datos solicitados del prestatario.
4. Finalmente, el servicio presenta los datos obtenidos del prestatario.

A partir del escenario principal de éxito se determinaron los escenarios alternos de éxito, así como los escenarios de fracaso.

Se elaboraron cinco diagramas de clases para el diseño de los servicios, sin embargo, en este documento solo se presenta uno debido a limitaciones de espacio, en la Figura 3 se muestra el diagrama de clases del servicio Sincronizar Prestatario (SyncPrestatario) que atiende al caso de uso 1: Sincronización de datos del prestatario.

En la Figura 3 se presentan 4 clases: la clase app.js, que es la principal del servicio; la clase SyncPrestatarioModel, que se utiliza para encapsular datos y lógica de negocio relacionados con los datos de prestatarios de una SOFOM; la clase SyncPrestatarioController, que gestiona la conexión a la base de

datos de acuerdo con el modelo definido en la clase SyncPrestatarioModel; y, finalmente, la clase SyncPrestatarioRoutes, que establece las rutas de acceso al servicio.

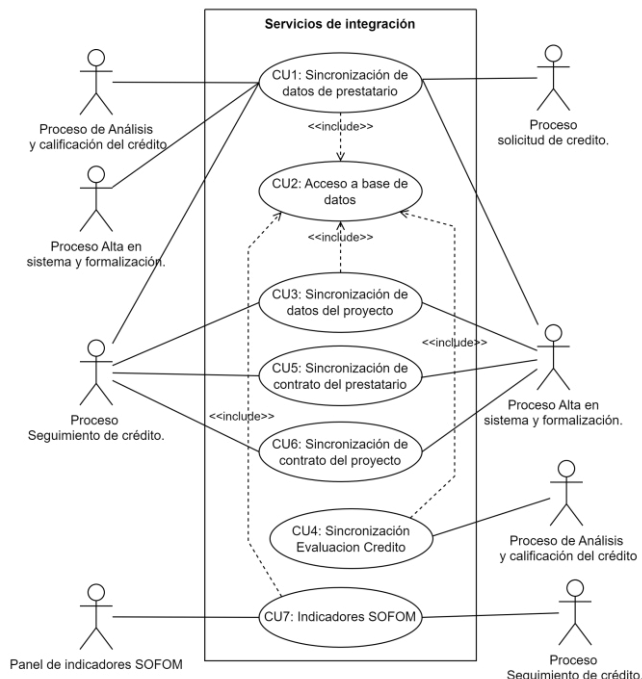


Figura 2. Diagrama de casos de uso.

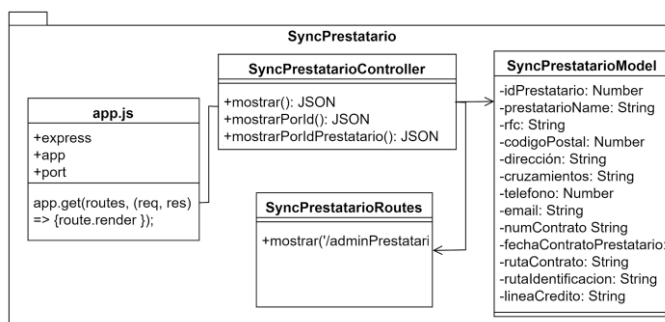


Figura 3. Diagrama de clases del servicio sincronizar prestatario.

A partir de los requerimientos del software, el análisis y diseño se decidió desarrollar un conjunto de 5 servicios web para atender los 8 requerimientos. Para la construcción de los servicios se utilizó Node.js que es una plataforma de desarrollo de software basada en JavaScript que permite crear aplicaciones web escalables y eficientes en el lado del servidor, para la base de datos se utilizó MongoDB. Se utilizó Git y GitHub para el versionado y alojamiento del código respectivamente. La razón de usar Git se debe a que es una herramienta esencial para el desarrollo de software porque facilita la gestión de versiones, la colaboración, el control de calidad y la distribución de proyectos.

El proyecto se alojó en GitHub en la siguiente dirección:
<https://github.com/EdgarVRP/SOFTNI-SyncPrestatario>

El diagrama de despliegue del servicio SyncPrestatario se muestra en la Figura 4. En donde se tiene el servidor Railway para realizar el despliegue.

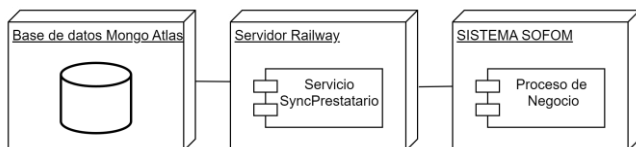


Figura 4. Diagrama de despliegue del servicio sincronizar prestatario.

Para poder rastrear y documentar la relación entre los requisitos del sistema y los componentes de software que los implementan, se realizó una matriz de seguibilidad, ya que es una herramienta fundamental en el desarrollo de software porque permite mantener un seguimiento detallado de las distintas etapas del proceso de desarrollo y asegurarse de que todas las especificaciones y requisitos del software sean implementados correctamente. Esta matriz también ayuda a garantizar la calidad del software final, al permitir una verificación completa y precisa de cada componente y función.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para el desarrollo de las pruebas se utilizó Postman porque es una herramienta útil para realizar pruebas en servicios web, ofrece una interfaz gráfica fácil de usar para enviar solicitudes HTTP y visualizar las respuestas, también se utilizó la extensión “REST Client” en Visual Studio Code.

4.1 Objetivo de las pruebas

Validar que el servicio SyncPrestatario proporcione los datos del prestatario cuando se haga una petición al servicio atendiendo a los requerimientos R01, R02 y R08.

Al servicio web SyncPrestatario se le pueden hacer 3 distintos tipos de peticiones:

A) Petición obtener los datos de todos los prestatarios

Se usa un método *get* para acceder al servicio, este método es el mostrado en el diagrama de clases de la Figura 3 en específico esta petición es atendida por el método *mostrar()* en la clase *SyncPrestatarioController*, proporciona un arreglo en formato JSON de todos los propietarios registrados en la base de datos.

B) Petición obtener información de un prestatario por su id en base de datos

Se usa un método *get* para acceder al servicio web, este método es el mostrado en el diagrama de clases de la Figura 3 en

específico esta petición es atendida por el método *mostrarPorId()* en la clase *SyncPrestatarioController*, la respuesta a esta petición es un arreglo con la información del prestatario, como ejemplo de una petición para solicitar información del primer registro se tiene la siguiente URL: <https://softni-syncprestatarior-production.up.railway.app/adminPrestatario/63d41ecec22069c376bed6af>

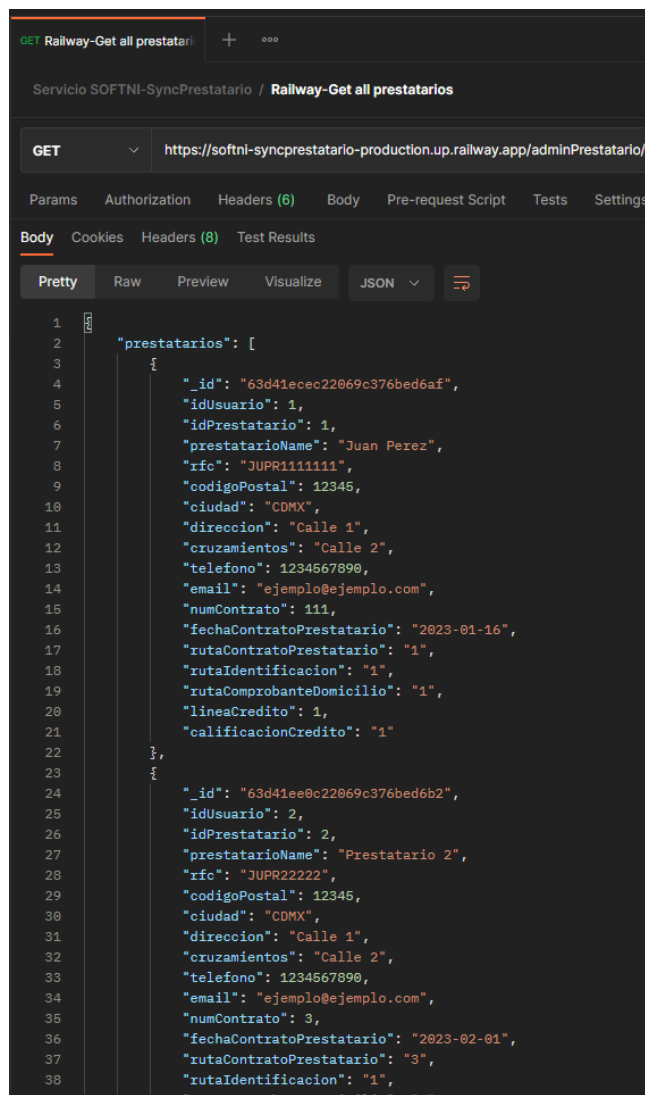


Figura 5: Petición *get* para obtener la información de todos los prestatarios utilizando Postman

C) Petición obtener información de un prestatario por su id de prestatario.

Se usa un método *get* para acceder al servicio web, este método es el mostrado en el diagrama de clases de la Figura 3 en específico esta petición es atendida por el método *mostrarPorIdPrestatario()* en la clase *SyncPrestatarioController*, la respuesta a esta petición es un arreglo con la información del prestatario, como ejemplo de una petición para solicitar

información del primer registro se tiene la siguiente URL:
<https://softni-syncprestatario-production.up.railway.app/adminPrestatario/idPrestatario/1>

En la Figura 5 se observa la respuesta del servicio descrito en el inciso A) en donde se utiliza un método *get*, a esta petición no se le pasan parámetros y la respuesta del servicio es un arreglo en formato JSON de prestatarios, se muestran en las líneas 3 a 22 los datos del prestatario con *idUsuario* e *idPrestatario* 1, en las líneas del 23 en adelante se muestra la información del prestatario con *idUsuario* e *idPrestatario* 2. Los requerimientos R01, R02 y R08 son atendidos con estos tres métodos *mostrar()*, *mostrarPorId()* y *mostrarPorIdPrestatario()* ya que permiten poner disponible el acceso a datos de los prestatarios para diferentes procesos de negocio en la SOFOM.

5. CONCLUSIONES

A partir de realizar una correcta documentación de procesos de negocio, establecer los requerimientos del software para solventar la necesidad de integración entre procesos de negocio, seguir el proceso de desarrollo de software como se detalla en la ISO12207 realizando el análisis, diseño, construcción y pruebas de los servicios realizados para atender la problemática, se concluyó que es posible la integración de procesos.

Todos los servicios presentados funcionan como se esperaba, los servicios web propuestos para la integración de procesos de negocio son una solución efectiva para automatizar y unificar los procesos y flujos de trabajo en una organización. Estos servicios permiten la comunicación entre diferentes sistemas y aplicaciones, así como la transferencia de datos y la ejecución de acciones automatizadas, lo que facilita la integración y mejora la eficiencia operativa.

La integración de procesos de negocio mediante servicios web ofrece ventajas significativas, como la reducción de errores manuales, la eliminación de tareas repetitivas, la mejora de la productividad y la reducción de costos operativos. Además, los servicios web permiten una mayor flexibilidad y escalabilidad, lo que facilita la integración de nuevos sistemas y aplicaciones en el futuro.

Es importante destacar que la implementación de servicios web para la integración de procesos de negocio debe ser realizada de manera cuidadosa y planificada, para garantizar una integración efectiva y una transición sin problemas. Además, es importante asegurarse de que se utilicen protocolos y estándares de comunicación adecuados, en este caso se utilizó JSON como respuesta de los servicios para poder ser utilizada la información por otro sistema backend o front end, también es importante para la realización de servicios de integración que se compartan los requerimientos, reglas de negocio, se escoja un diseño de arquitectura y cualquier otra información relevante para la integración.

6. REFERENCIAS

- [1]. Lin, F., Sheng, O. R., & Wu, S. (2005). An integrated framework for eChain bank accounting systems. *Industrial Management & Data Systems*, 105(3), 291–306. <https://doi.org/10.1108/02635570510590129>
- [2]. Themistocleous, M., Basias, N., & Morabito, V. (2014). A Framework for Service-oriented Architecture Adoption in e-Banking: the Case of Banks from a Transition and a Developed Economy. *Information Technology for Development*, 21(3), 460–479. <https://doi.org/10.1080/02681102.2014.939605>
- [3]. Arief Maulana, W., & Rasim, M. T. (2019). PAYMENT POINT ONLINE BANK APPLICATION (PPOB) USING WEB SERVICE IN PT. SUKSES MITRA MANDIRI BASED ON ANDROID. *Jurnal Ilmiah Komputer dan Informatika (KOMPUTA)*.
- [4]. Oliveira, R. A., Raga, M. M., Laranjeiro, N., & Vieira, M. (2020). An approach for benchmarking the security of web service frameworks. *Future Generation Computer Systems*, 110, 833–848. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.10.027>
- [5]. Zeng, Z., Yuan, X., Liang, J., & Li, Y. (2021). Designing and implementing an SWMM-based web service framework to provide decision support for real-time urban stormwater management. *Environmental Modelling & Software*, 135, 104887. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104887>
- [6]. Shashwat, A., Kumar, D., & Chanana, L. (2017). An end to end security framework for service oriented architecture. 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (Trends and Future Directions) (ICTUS). <https://doi.org/10.1109/ictus.2017.8286056>
- [7]. ben Seghir, N., & Kazar, O. (2017). A new framework for web service discovery in distributed environments. 2017 First International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS). <https://doi.org/10.1109/edis.2017.8284046>
- [8]. Karya, S., & Heripracoyo, S. (2020). Website Design For Non-Cash Customer Transaction Data Visualization In XYZ Bank. 2020 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech). <https://doi.org/10.1109/icimtech50083.2020.9211152>
- [9]. Weitzel, T. (2006). Process Governance and Optimization for IT Reliant Business Processes: An Empirical Analysis of Financial Processes in Germany’s Fortune 1,000 Non-Banks. *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06)*. <https://doi.org/10.1109/hicss.2006.392>
- [10]. Fanbo, M., Minli, J., & Wuliang, P. (2010). A Business Process Management System Based on Workflow Technologies. 2010 Third International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. <https://doi.org/10.1109/icinis.2010.182>
- [11]. Aouachria, M., Leshob, A., Gonzalez-Huerta, J., Ghomari, A. R., & Hadaya, P. (2017). Business Process Integration: How

- to Achieve Interoperability through Process Patterns. 2017 IEEE 14th International Conference on e-Business Engineering (ICEBE). <https://doi.org/10.1109/icebe.2017.26>
- [12]. Qusef, A., Hamdan, A., & Murad, S. (2017). Business process integration with quality characteristics: Quality-oriented process. 2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS). <https://doi.org/10.1109/icemis.2017.8273030>
- [13]. Mao, C. (2010). Complexity Analysis for Petri Net-Based Business Process in Web Service Composition. 2010 Fifth IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering. <https://doi.org/10.1109/sose.2010.24>
- [14]. Ganesh, J., & Anand, S. (2005). Web services, enterprise digital dashboards and shared data services: a proposed framework. Third European Conference on Web Services (ECOWS'05). <https://doi.org/10.1109/ecows.2005.29>
- [15]. Parekh, M., Patel, H., & Patil, S. (2017). BRB dashboard: A web-based statistical dashboard. 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). <https://doi.org/10.1109/iciiecs.2017.8276076>
- [16]. Winanta, K. A., Kirana, T., Hefni Al-Fahsi, R. D., Patar Jiwandono Pardosi, A., Suryani, O. F., & Ardiyanto, I. (2019). Moving Objects Counting Dashboard Web Application Design. 2019 International Electronics Symposium (IES). <https://doi.org/10.1109/elecsym.2019.8901580>
- [17]. Belouadha, F. Z., Omrana, H., & Roudies, O. (2014). Modeling and matching business processes using Web services. 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS). <https://doi.org/10.1109/icmcs.2014.6911327>
- [18] Evan D. Morrison, Alex Menzies, George Koliadis, and Aditya K. Ghose. 2009. Business process integration: method and analysis. In Proceedings of the Sixth Asia-Pacific Conference on Conceptual Modeling - Volume 96 (APCCM '09). Australian Computer Society, Inc., AUS, 29–38.
- [19] Xitong Guo, Sherry X. Sun, and Doug Vogel. 2014. A Dataflow Perspective for Business Process Integration. ACM Trans. Manage. Inf. Syst. 5, 4, Article 22 (March 2015), 33 pages. <https://doi.org/10.1145/2629450>
- [20] Jingzhi Guo, Zhuo Hu, Chi-Kit Chan, Yufeng Luo, and Chun Chan. 2008. Document-oriented heterogeneous business process integration through collaborative e-marketplace. In Proceedings of the 10th international conference on Electronic commerce (ICEC '08). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 39, 1–10. <https://doi.org/10.1145/1409540.1409593>
- [21] David de Francisco and Pierre Grenon. 2009. Enhancing telecommunication business process representation and integration with ontologised industry standards. In Proceedings of the 4th International Workshop on Semantic Business Process Management (SBPM '09). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 59, 1–6. <https://doi.org/10.1145/1944968.1944979>

Implementación del Proceso de Análisis Jerárquico mediante una Aplicación Web aplicando la metodología ICONIX, para la mejora de toma de decisiones en el Proceso de Captación de Personal.

Ing. Jesús Edgar Flores Contreras

Instituto Tecnológico de Alvarado, Medellín, Veracruz, México,
jesusedgar.florescontreras@gmail.com

ABSTRACT

Many companies have joined the digitization of their processes through new technologies, especially in the current post-Covid stage where the challenges in the recruitment of personnel are greater. This article shows the development and implementation of a responsive Web application in the company IMV (Industria Metalúrgica Veracruzana, SA de CV), carried out under the ICONIX methodology and its artifacts for the development of the software product through free use frameworks, automating the Recruitment Process by implementing the Hierarchical Analysis Process (AHP) with the objective of having a tool that helps in decision making in the evaluation and selection of personnel to be hired.

Keywords - Web Development, ICONIX, Hierarchical Analysis, Open Source Frameworks, Recruitment.

RESUMEN

Muchas empresas se han sumado a la digitalización de sus procesos mediante nuevas tecnologías, y más en la actual etapa post-Covid donde los retos en la contratación de personal son mayores (Factorial, 2022). En este artículo se muestra el desarrollo e implementación de una aplicación Web responsiva en la empresa IMV (Industria Metalúrgica Veracruzana, SA de CV), realizado bajo la metodología ICONIX y sus artefactos para el desarrollo del producto de software mediante frameworks de uso libre, automatizando el Proceso de Captación de Personal implementando el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) con el objetivo contar con una herramienta que ayude a la toma de decisiones en la evaluación y selección del personal a contratar.

Palabras clave: Desarrollo Web, ICONIX, Análisis Jerárquico, Frameworks de Uso Libre, Captación de Personal.

1. INTRODUCCIÓN

Industria Metalúrgica Veracruzana es una empresa mexicana radicada en la ciudad H. Puerto de Veracruz, Veracruz., especializada en la fabricación, aplicación de recubrimientos, inspección, traslado y montaje de estructuras metálicas a nivel nacional. Es una empresa experta en la fabricación de diversos tipos de estructuras metálicas con certificados de calidad, principalmente para el sector energético, industrial y privado, apegados a los

estándares internacionales de fabricación (Industria Metalúrgica Veracruzana, 2023).

El Departamento de Reclutamiento de la empresa es responsable de las acciones necesarias para contratar el talento adecuado para ocupar un puesto, por ello es de vital importancia tener una estrategia y planeación de reclutamiento, ya que sin el capital humano necesario, ninguna compañía puede ser competitiva.

Por definición, el proceso de captación de personal contiene un conjunto de etapas que confluyen para registrar, evaluar y seleccionar a un conjunto de candidatos, los cuales se calificarán para lograr tener el mejor perfil a contratar para el puesto ofertado.

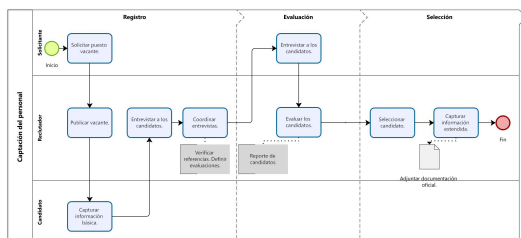


Figura 1: Proceso de captación de personal.

2. ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de gestión del proceso de selección (ATS del inglés Applicant Tracking Systems) es un software el cual gestiona todo el proceso de contratación y reclutamiento. Ayuda a acelerar la gestión de candidatos y reducir significativamente el tiempo de cobertura de vacantes. Desde publicar el trabajo en línea hasta hacer la oferta de trabajo, un ATS en la fase de reclutamiento rastrea todas las actividades del departamento de reclutamiento (Zoho, 2023).

El Proceso de Análisis Jerárquico, AHP (Saaty, 1990), es una técnica estructurada para la toma de decisiones por medio de comparaciones entre pares.

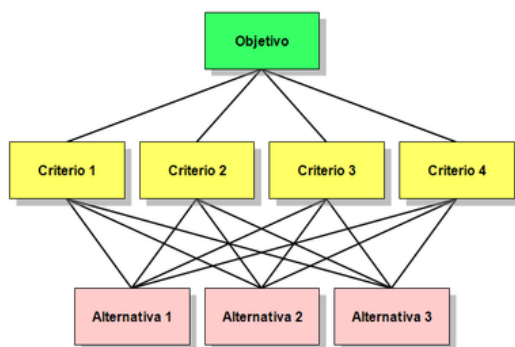


Figura 2: Proceso de análisis jerárquico.

La cual, define una escala de clasificación, la cual se puede observar en la figura 3. (Estrada-Esponda, R. y González-Campo, C., 2018).

Escala	Definición	Explicación
1	Igualmente preferida	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro
7	Muy fuertemente preferida	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro. En la práctica se puede demostrar su dominio
9	Extremadamente preferida	La evidencia favorece en la más alta medida a un factor frente al otro

Figura 3. Escala de Saaty de comparación de juicios por pares para las preferencias del proceso de análisis jerárquico.

Las etapas generales del AHP propuestas por Saaty en su formulación inicial son:

1. Modelación.
2. Valoración.
3. Priorización y síntesis.
4. Análisis de sensibilidad.

Existen ejemplos de la aplicación del Proceso de Análisis Jerárquico en apoyo de la toma de decisiones multicriterio en distintas áreas de conocimiento, desde la toma de decisiones de al seleccionar proveedores hasta en el desarrollo de software.

3. PROBLEMÁTICA

Actualmente, el departamento de reclutamiento no cuenta con una herramienta informática y captura la información generada del proceso de captación de personal mediante registros en hojas de cálculo aisladas entre sí.

Por lo tanto, se propone el desarrollo de una aplicación Web responsiva que automatice el proceso de captación de personal y que implemente el proceso de análisis jerárquico en la actividad: evaluar los candidatos, que permita la reducción del tiempo de atención

al candidato, mejorando la trazabilidad de los datos, evitar perdida, duplicidad, y errores en la información, reducir el uso de impresiones, así como, específicamente que sirva como herramienta en la toma de decisiones basado en los criterios definidos por el proceso para la selección de la mejor alternativa de candidato.

Asimismo, el sitio Web responsivo será publicado en la página de la empresa, www.imvindustrial.mx para fungir como medio de comunicación entre el candidato y el departamento de reclutamiento, donde se podrán ofertar las diferentes vacantes existentes.

4. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

Para el desarrollo del producto de software se define el uso de la metodología ICONIX (Rosenberg y Scott, 1999), como un conjunto de fases simplificadas que unifican los métodos de orientación a objetos con el objetivo de abarcar el ciclo de vida de un proyecto (Rosenberg et al, 2001).

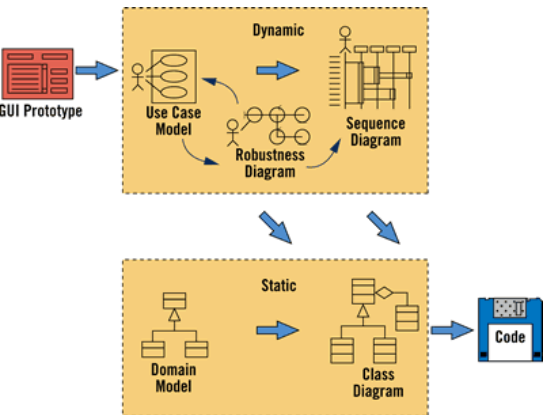


Figura 4: Metodología ICONIX.

Se destacan las etapas de: análisis de requerimientos, diseño preliminar, diseño detallado e implementación (Martina, S. y Marion, S., 2015).

Etapa	Descripción
Análisis de requerimientos	Identificar objetos de dominio y relaciones de agregación y generalización, así como el prototipo rápido. Creación de casos de uso de requerimientos funcionales y no funcionales.
Diseño preliminar	Describir los casos de uso, así como identificar los grupos de objetos y clases.
Diseño detallado	Identificar mensajes y métodos, se concreta modelo estático.
Implementación	Se escribe el código y realizan las pruebas necesarias.

Tabla A.1. Etapas de ICONIX.

Las características fundamentales son:

- Iterativo e incremental del desarrollo del modelo del dominio y la identificación de los casos de uso.
- Trazabilidad entre los diferentes artefactos.
- Dinámica del UML mediante diagramas de casos de uso, diagramas de secuencia y de colaboración (Rosenberg et al, 2005).

Algunas ventajas de la metodología son:

- Capacidad de respuesta a cambios de requisitos a lo largo del desarrollo.
- Entrega continua y en plazos breves de software funcional.
- Trabajo conjunto entre el cliente y el equipo de desarrollo.
- Simplicidad.
- Excelencia técnica y buen diseño.
- Mejora continua de los procesos y el equipo de desarrollo.

5. RESULTADOS

Sobre el Proceso de Análisis Jerárquico

El departamento de reclutamiento de la empresa IMV define la ponderación de los criterios del proceso de análisis jerárquico basado en la información de la solicitud de empleo, con los campos de:

- Numero de edad.
- Estatus de estado civil.
- Nivel de escolaridad.
- Ubicación domiciliaria vs ubicación de la oficina.
- Diferencia entre el sueldo deseado y el propuesto.
- Número de dependientes económicos.
- Número de referencias laborales.
- Número de referencias personales.
- Disponibilidad actual.

Sobre el Proceso de Captación de Personal

Se aplicará en la actividad de: Evaluar los candidatos de la etapa de Evaluación del Proceso de Captación de Personal.

Sobre la Metodología ICONIX

Se utilizara la aplicación Enterprise Architect para el modelado en ICONIX.

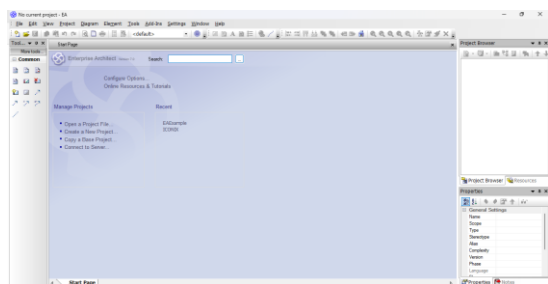


Figura 5: Enterprise Architect

Se entregarán los artefactos siguientes:

Etapa	Modelo estático	Modelo dinámico
Análisis de requerimientos	Modelo Estático	Modelo de casos de uso.
Diseño preliminar	Modelo estático actualizado.	Diagrama de robustez.
Diseño detallado	Modelo de clases.	Diagrama de secuencia.
Implementación	Planeación de pruebas unitarias.	Diagrama de componentes.

Tabla A.2. Artefactos entregables.

Sobre el Desarrollo del Producto de Software

Se utilizarán frameworks de uso libre para el desarrollo de la programación como:

Ambiente	Descripción
Frontend	HTML, CSS, Bootstrap,
Backend	MySQL, PHP, Apache

Tabla A.3. Framework de uso libre.

Sobre la Vinculación con el Sector Productivo

Para el alcance de este proyecto se considera la implementación en ambiente cliente/servidor para desarrollo, pruebas y producción dentro de las instalaciones de la empresa Industria Metalúrgica Veracruzana, así como un despliegue de los datos iniciales con información real documentada del proceso de captación de personal por parte del Departamento de Reclutamiento.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presentó en este artículo el proceso de implementación del Proceso de Análisis Jerárquico mediante una aplicación Web aplicando la metodología ICONIX, para la mejora de toma de decisiones en el proceso de captación de personal la cual brindará una herramienta funcional para la evaluación y selección del candidato ideal.

Cabe señalar, que las herramientas con las cuales se desarrollará el producto de software brinda un precedente para la generación de conocimiento, así como implementar una metodología de desarrollo de software para futuros productos de software aplicados a nuevas necesidades de la empresa Industria Metalúrgica Veracruzana.

7. REFERENCIAS

Factorial. (2022). Tendencias en recursos humanos LATAM 2023.

Industria Metalúrgica Veracruzana. (1 de enero de 2023). *Nosotros ¿Qué hacemos?* <https://imvindustrial.mx/industria-metalurgica-veracruzana.html>

Zoho. (2 de febrero de 2023). ¿Qué es un sistema de gestión del proceso de selección (ATS)? <https://www.zoho.com/es-xl/recruit/what-is-ats.html>

Estrada-Esponda, R. y González-Campo, C. (2018). Análisis Jerárquico de Procesos para la Implementación de un Modelo de Referencia de Procesos de Gestión de Conocimiento en el Ámbito del Desarrollo de Software. Revista Logos, Ciencia y Tecnología, vol. 10, núm. 4, 2018, 113-114. <https://revistalogos.policia.edu.co:8443/index.php/rlct/article/view/512>

Rosenberg, D. Stephens, M. y Collins-Cope, M. (2005). Agile Development with ICONIX Process: People, Process, and Pragmatism. APRESS.

Rosenberg, D. y Scott, K. (2001). Applying Use Case Driven Object Modeling with UML: An Annotated e-Commerce Example. Addison Wesley.

Martina, S. y Marion, S. (2015). UML @ Classroom An Introduction to Object-Oriented Modeling. Springer.

Toskano, Gérard. (2005). *El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores*. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/toskano_hg.htm

Osirio, J. y Orejuela, J. (2008). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la Toma de

Decisiones Multicriterio. Ejemplo de Aplicación. Universidad Tecnológica de Pereira.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84920503044>

Menéndez, J. y González, L. (2017). Análisis de Proyectos de Desarrollo de Aplicaciones Informáticas Aplicando el Proceso Analítico Jerárquico. Centro de Información y Gestión Tecnológica de Pinar del Río. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=637867021008>

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios Nuestro Señor.

El autor de este trabajo agradece al Instituto Tecnológico de Alvarado Campus Medellín y a la empresa Industria Metalúrgica Veracruzana, SA de CV., por el apoyo brindado.

A mi familia: mi esposa Liz, mi hija Sofía y mi próxima hija.

Extracción de información de carátulas de hidrómetros usando Visión Artificial

Héctor Eduardo Ramos Covarrubias*, Arturo Legarda Sáenz**, Jesús Arturo Alvarado Granadino***, Hernán de la Garza Gutiérrez****, Arturo Martínez Ayala*****.

*Tecnológico Nacional de México /
Instituto Tecnológico de Chihuahua II. DEPI.
Ave. de las Industrias 11101, Complejo Industrial Chihuahua, C.P. 31130 Chihuahua, Chih. México.

*m14550323@chihuahua2.tecnm.mx
**arturo.ls@chihuahua2.tecnm.mx
***jesus.ag@chihuahua2.tecnm.mx
****hernan.gg@chihuahua2.tecnm.mx
*****arturo.ma@chihuahua2.tecnm.mx

Resumen: En este trabajo se presenta un software para detectar y extraer información de los hidrómetros residenciales, en particular los números que representan el consumo de agua, utilizando técnicas de Visión Artificial y la red neuronal YOLOv3 por medio del Framework Darknet (Redmon & Farhadi, 2018). En el desarrollo del trabajo se utilizaron diversos datasets, tanto de tomas fotográfica propias de hidrómetros como de otros datasets de acceso libre. Se etiquetaron más de 8,000 imágenes para el entrenamiento de la red neuronal, tanto hidrómetros analógicos como digitales. Los resultados de identificación de los números mostraron un porcentaje que ronda entre 80% y 99% según como esté etiquetado el número.

Keywords: YOLOv3, Darknet, Google Colab, Visión Artificial, Detección de hidrómetros.

1. INTRODUCCIÓN

La población en el estado de Chihuahua ha estado en constante crecimiento y para el 2026 se estima que aumente en más de 150,000 habitantes. Por tal motivo, la demanda de los servicios públicos, como el agua se incrementa en el estado y esto conlleva a la necesidad de adquisición de más hidrómetros. Antes de instalar un hidrómetro se necesita verificar su funcionamiento, pero esta verificación es lenta, dedicando recurso humano para obtener la información y corroborar su funcionamiento correcto.

Se han desarrollado varios trabajos que cuyo objetivo la lectura automática de los hidrómetros, y como en ejemplo podemos mencionar que en uno de ellos se verifican estos equipos identificando los díales de la carátula aplicando métodos de Visión Artificial y así poder encontrar la posición exacta de las agujas de los díales, logrando obtener un margen de entre 97.46% y 99.133% (Yan et al., 2018).

El objetivo de este trabajo es desarrollar un software que detecte y extraiga información de hidrómetros antes de que se instalen. El alcance es desarrollar un programa que podrá utilizarse posteriormente en un equipo de medición de hidrómetros. La información que interesa es el valor medido de estos equipos que se muestran en un contador numérico

presentes en la carátula. Lo anterior se hace utilizando técnicas de Visión Artificial y Redes Neuronales.

La herramienta que se seleccionó fue YOLOv3 (Redmon & Farhadi, 2018) la cual, es un clasificador de imágenes bastante novedoso, cuya principal característica es la velocidad que tiene, ya que puede ejecutarse de 22 ms a 28.2 mAP (*mean Average Polling*) (Gad, 2021). Este clasificador es tres veces más rápido que SSD (*Single Shot MultiBox Detector*) (Liu et al., 2016).

Para utilizar YOLOv3 se debe de seleccionar un *framework*, en este caso el *framework* es Darknet (Redmon & Farhadi, 2018). Este *framework* es de código abierto y puede trabajar con CPU's o GPU's. Darknet tiene modelos entrenados que nos ayudan a la detección de objetos comunes en imágenes, pero si se quiere ser más específico con la detección de un tipo de objeto en particular, se necesita hacer uso de un modelo ya entrenado como base y un *dataset* de imágenes de ese tipo de objeto previamente etiquetadas.

Debido a que el entrenamiento de este *framework* exige una gran cantidad de recursos computacionales, los cuales son difíciles de encontrar en equipos de cómputo de uso cotidiano, se optó por utilizar Google Colab Pro (Google Colaboratory, s. f.). Ésta es una plataforma que provee la empresa Google que permite el uso de recursos computacionales de mayor

capacidad (Núcleos de CPU, GPU, RAM, etc.). La versión de paga tiene un precio de suscripción de 10 dólares mensuales y esta permite hacer uso de 3 distintos tipos de GPU para realizar operaciones computacionales que ocupan bastante recursos.

2. MÉTODO

En la Figura 1, se describe el proceso de la extracción de la información de los hidrómetros; primero con un entrenamiento se tiene contemplado detectar las carátulas dentro de una imagen, enseguida en cada carátula detectada se identifica el área de los números. Posteriormente se analizará esa área para poder identificar los números presentes en la imagen.

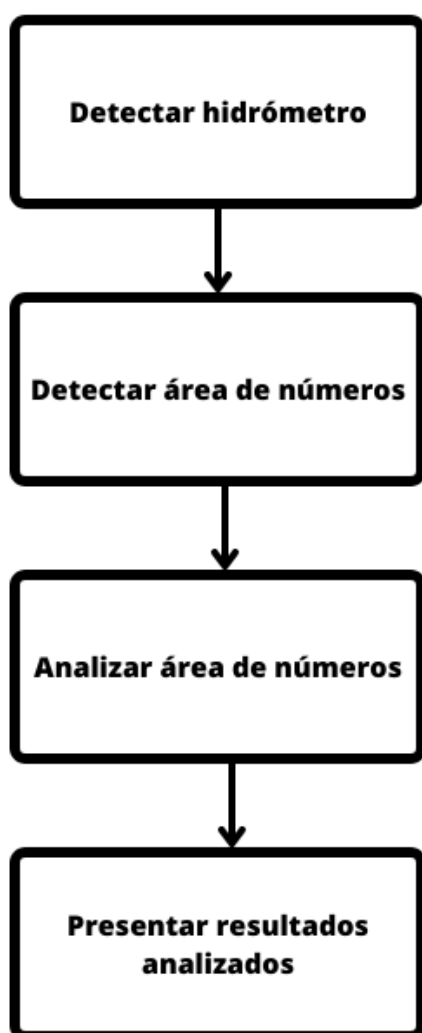


Figura 1. Proceso de la extracción de información.

Para poder llegar a un correcto funcionamiento de la herramienta se realizaron dos entrenamientos; el primer entrenamiento sirve para poder localizar la carátula del hidrómetro y el área de los números del medidor. El segundo entrenamiento se hace para identificar los números presentes en el área localizada del paso anterior (Ver Figura 2).

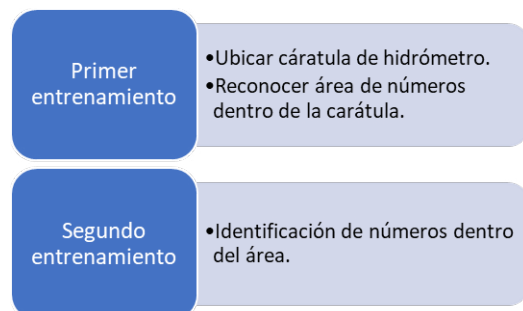


Figura 2. Actividades en cada uno de los entrenamientos.

3. PRIMER ETIQUETADO Y ENTRENAMIENTO

Para realizar el primer entrenamiento de YOLOv3 se necesita tener un *dataset* de imágenes etiquetadas. Para llevar a cabo esta tarea, se usó la herramienta llamada *labelimg* (Label Studio — Data Labeling & Annotation Tool Interactive Demo, s. f.), la cual es una herramienta de uso libre que nos permite etiquetar imágenes para YOLOv3. Su uso es muy sencillo, basta con seleccionar el área de interés dentro de una imagen y etiquetarla con el nombre que va a llevar, y con eso, el programa genera un archivo de texto donde vienen las etiquetas que contiene cada área y sus respectivas coordenadas, ya listas con el formato para YOLOv3 (ver Figura 3).

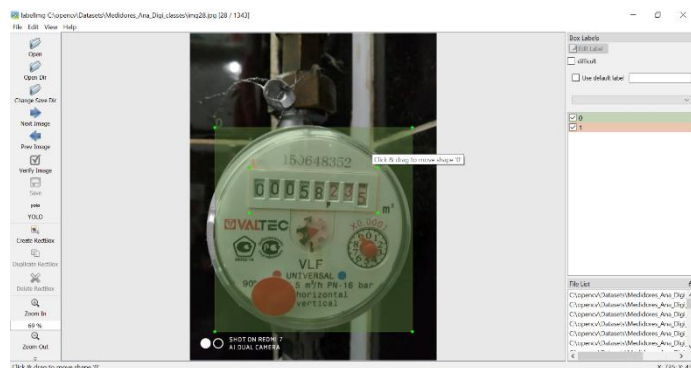


Figura 3. Herramienta labelimg.

En este primer etiquetado se usó un *dataset* que consta de imágenes de hidrómetros, tanto de uso libre (Yang et al., 2019)

como de imágenes propias. En total conforman más de 1200 imágenes, tanto con hidrómetros analógicos como digitales. En la figura 4 se pueden observar ejemplos de una carátula analógica y otra digital ya etiquetadas, estas etiquetas están marcadas por un recuadro de color verde. Para realizar el entrenamiento se utilizó el 85% de las imágenes y el restante 15% para la fase de prueba.

Cada imagen se etiquetó de manera manual, teniendo en total dos etiquetas por cada imagen. El área de la carátula se identificó como '0' y al área de los números como '1' (ver Figura 4).



Figura 4. Ejemplos de hidrómetros con carátulas analógicas y digitales y vistas de marcos resaltados.

Una vez que se tiene preparado el *dataset* de imágenes etiquetadas, se continúa con el entrenamiento. Para realizar el primer entrenamiento se optó por trabajar con Google Colab Pro.

Google Colab Pro es la versión de paga inicial de dicha plataforma, cuenta con 32 GB de RAM, tiene 3 opciones de GPU (K80, T4 y P100), además cuenta con ejecución de segundo plano de 24 horas. Todo esto desde su página de internet (Google Colaboratory, s. f.).

Para poder detectar las carátulas y el área de los números se hicieron pequeños ajustes a la configuración inicial de YOLOv3. Estos ajustes sólo tienen que ver con la cantidad de imágenes que se tiene en el *dataset* y así poder obtener un mejor resultado.

4. SEGUNDO ETIQUETADO Y ENTRENAMIENTO

Ya con la primera red entrenada, que sirve para la detección de la carátula de hidrómetros y el área de los números de dichas carátulas, ahora se procede con la segunda parte del etiquetado y entrenamiento para identificar los números.

Para esta segunda etapa se utilizan 3 *datasets* de imágenes de tomas de números de diversos medidores. El primer *dataset* consta de las imágenes del etiquetado y entrenamiento realizado en la etapa anterior. El segundo *dataset* de imágenes es el de HCILAB, donde se tiene un total de 6,000 imágenes (ver figura 5) (Yang et al., 2019).



Figura 5. Ejemplo de imagen del *dataset* HCILAB.

El tercer *dataset* utilizado, fue un conjunto de imágenes de elaboración propia. Para la creación de este *dataset* se realizaron tomas fotográficas cada diez segundos en un ambiente controlado, con lo que se obtuvo un total de 1,000 imágenes.

Juntando los tres *datasets* fueron más de ocho mil imágenes recopiladas para el segundo entrenamiento. Aquí también se seleccionó el 85% de las imágenes para la fase de entrenamiento y el 15% para la de prueba.

Todas las imágenes se fueron etiquetadas con el formato para YOLOv3. El primer y tercer *dataset* fueron etiquetados de manera manual con la herramienta labeling. El segundo se elaboró con una herramienta en Python para poder convertir la etiqueta que viene en el *dataset* a formato de YOLOv3 (ver figura 6).

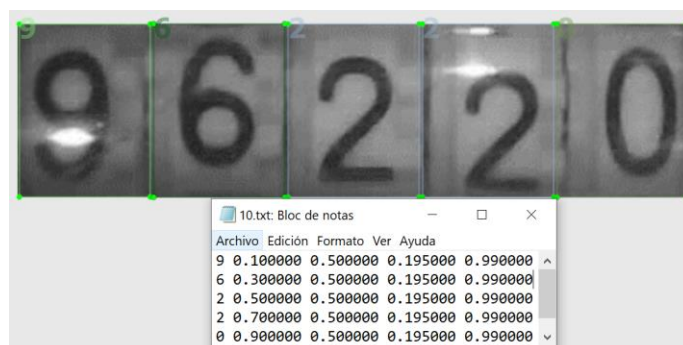
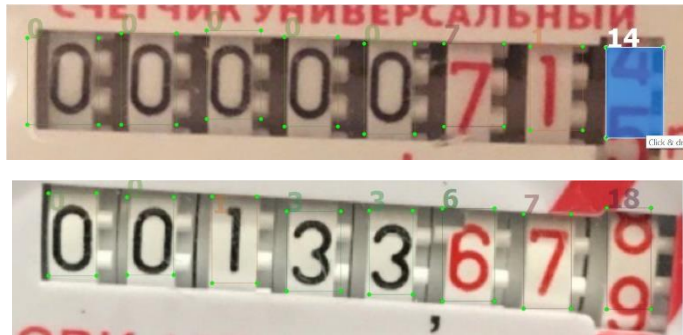


Figura 6. Imagen etiquetada con herramienta en Python.

La metodología que se usó para el etiquetado en esta segunda etapa fue presentada en el artículo Fully Convolutional Sequence Recognition Network for Water Meter Number Reading (Yang et al., 2019). Aquí se propone el etiquetado de

se puede apreciar el resultado del entrenamiento para cada etiqueta (AP corresponde al porcentaje de identificación).



Para la segunda etapa de entrenamiento se repitieron los pasos realizados en la primera etapa, pero en esta ocasión se aplicó solamente a las imágenes del área de los números.

Para el segundo entrenamiento se logró un AP “Average Polling” para cada etiqueta completa e intermedia. En la tabla 1



En la Figura 10 se puede observar cómo el entrenamiento detecta cada número y lo etiqueta correctamente empalmando el dígito identificado.



Figura 10. Números reconocidos y etiquetados.

Tabla 1. Porcentaje de identificación.

Número de etiqueta	Porcentaje de identificación	Número de etiqueta	Porcentaje de identificación
0	91.96 %	10	92.03 %
1	97.45 %	11	82.50 %
2	96.30 %	12	94.57 %
3	99.43 %	13	80.48 %
4	96.25 %	14	90.91 %
5	96.00 %	15	83.33 %
6	97.60 %	16	95.98 %
7	93.73 %	17	98.61 %
8	98.08 %	18	89.63 %
9	92.54 %	19	86.66 %

6. CONCLUSIÓN

Se obtuvo una respuesta del 94% de detección, la cual es bastante favorable al momento de la detección de la carátula del hidrómetro y área de números.

Para detección de números, se obtuvieron resultados entre el 80% y el 99% de detección, aunque para los números que están completos (etiquetas 0 al 9) no hubo ningún problema para la detección ya que se tienen porcentajes que oscilan entre el 91.96% y 99.43% (Ver Tabla 1).

Para las etiquetas de números en transición o parcialmente ocultos, etiquetados del 10 al 19, fue en donde se presentan más inconsistencias. El porcentaje de identificación para estas etiquetas tiene un rango más amplio (80.48% hasta 98.61%). Una posible explicación es que el *dataset* de entrenamiento está desbalanceado respecto a la cantidad de cada etiqueta.

Se espera que un futuro poder probar una versión mejorada de YOLO, para poder verificar si el funcionamiento mejora. También se pretende aumentar la cantidad de imágenes del *dataset* de etiquetas intermedias. Con los resultados obtenidos al momento el software puede ser instalado en un equipo de medición de hidrómetros.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv (Cornell University). <https://arxiv.org/pdf/1804.02767>
- Gad, A. F. (2021, 9 abril). Mean Average Precision (mAP) Explained. Paperspace Blog. <https://blog.paperspace.com/mean-average-precision/>
- Yang, F., Jin, L., Lai, S., Gao, X., & Li, Z. (2019). Fully Convolutional Sequence Recognition Network for Water Meter Number Reading. IEEE Access, 7, 11679-11687. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2891767>
- Google Colaboratory. (s. f.). <https://colab.research.google.com/?hl=es>
- Label Studio — Data Labeling & Annotation Tool Interactive Demo. (s. f.). <https://labelstud.io/playground/>
- Redmon, J. (s. f.). Survival Strategies for the Robot Rebellion. <https://pjreddie.com/>
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S. M., Fu, C., & Berg, A. C. (2016). SSD: Single Shot MultiBox Detector. Lecture Notes in Computer Science, 21-37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
- Yan, G., Sun, J., & Lu, T. (2018). Research on Monocular Vision Positioning Technology Used in Water Meter Verification. 2018 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). <https://doi.org/10.1109/icmcce.2018.00020>

Propuesta de una línea base de prácticas de UX, que permitan fortalecer el proceso de Ingeniería de Software en proyectos que usan estrategias de innovación abierta: Caso MVM Ingeniería de Software SAS

Ph.D. María Clara Gómez Álvarez*
MSc. Ricardo Alonso Gallego Burgos**
Patricia Elena Gómez Muñoz***

*Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín (mcgomez@udemedellin.edu.co) ** Unidad de Experiencia Digital, MVM Ingeniería de Software SAS (ricardo.gallego@mvm.com.co) ***Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín (patricia.gomez@mvm.com.co)

Abstract: Software development companies must consider the satisfaction of the interested parties, especially the users and within the quality attributes include the user experience (UX) as a relevant factor. The UX is considered important, since the success or failure of the software will depend on the ease with which users can handle it and interact with it in a way that generates a positive perception, achieves acceptance and allows greater use. Hence, more UX practices are being brought into the software development life cycle. This research paper reviews the models, tools, and UX methods applicable to software development. Its goal is proposing a baseline of UX practices that can be referenced within the software engineering process. This baseline was used to define the processes that MVM Ingeniería de Software S.A.S. carried out when the different services that imply the use of UX practices are provided.

Keywords: UX, engineering process, models, tools, methods, baseline

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas de desarrollo de software requieren incluir las necesidades de los usuarios como un factor importante para cumplir sus expectativas y es así como se plantea este trabajo de investigación empleando el método de estudio de caso (Fong Reynoso, 2008), fundamentándose en la pregunta de investigación: ¿Cómo las prácticas de experiencia de usuario (UX por sus siglas en inglés) pueden habilitar los procesos de ingeniería de software en escenarios de innovación abierta con lo cual se puedan desarrollar soluciones de alto valor para sus grupos de interés? La hipótesis de investigación es: una línea base del conjunto de prácticas de UX integrada al proceso de ingeniería de software en escenarios de innovación abierta permiten la construcción de soluciones que agregan valor a los procesos de negocio de clientes y usuarios.

La unidad de análisis está compuesta por la empresa colombiana de desarrollo de software MVM Ingeniería de Software SAS (MVM) con sus procesos, para los cuales se quiere incorporar prácticas de UX. El artículo está estructurado como sigue. Primero se presenta la metodología propuesta, luego habla de los antecedentes. A continuación, describe la propuesta de solución, sigue la presentación de resultados y finaliza con las conclusiones.

2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para desarrollar la línea base incluyó cuatro fases como se muestra en la Figura 1.

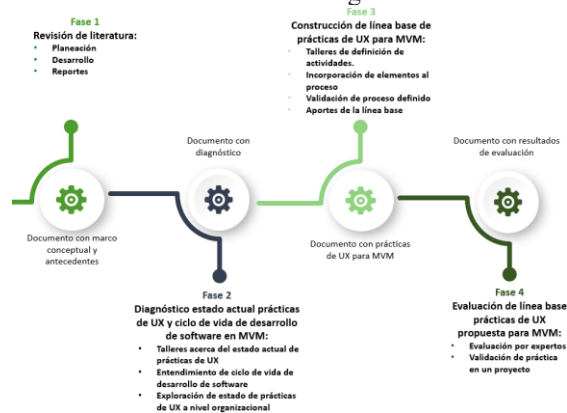


Fig. 1. Metodología propuesta para desarrollar la línea base.

3. ANTECEDENTES

MVM a lo largo de su trayectoria, ha tenido presente dentro de su estrategia usar prácticas de innovación abierta como elemento clave para aumentar su competitividad. En este ambiente, los usuarios se han convertido en parte importante del proceso de innovación y la UX como tal, se ha establecido como un nuevo impulsor, ya que ahora en lugar de estar centrados en las características de un producto o servicio, es necesario garantizar que los usuarios sean influyentes para tener mayor cobertura y aceptación (Curley & Adviser, n.d.).

En general, en los sistemas de software se ofrece algo de UX, ya sea que se haya trabajado explícitamente o no durante el ciclo de vida del desarrollo, y aunque no se puede garantizar una cierta experiencia del usuario sobre las funcionalidades del software, es importante considerar principios, prácticas, modelos de manera que sea más probable que se cumplan los criterios en que se basa una UX bien calificada (Hassenzahl, 2008). De hecho, la simple aplicación de estas características asociadas a la UX de forma aislada no es suficiente (Abrahão et al., 2010). Al igual que los métodos y prácticas utilizados para respaldar otras características de calidad del software deben integrarse en los procesos de desarrollo y considerarse transversalmente en los proyectos. La UX y el desarrollo de software tienen diferentes enfoques que representan retos para su integración: inicialmente la claridad del concepto de UX para que no se confunda con usabilidad (Kashfi et al., 2019), el enfoque colaborativo del trabajo entre los equipos que permita comprender el porqué y el qué de lo que se está haciendo (Zaina et al., 2021), entre otros.

Consistente con este contexto MVM identificó la necesidad de integrar prácticas de UX en su ciclo de desarrollo de software para brindar una mejor calidad en los productos que realiza, brindar un servicio que agregue valor a sus clientes y obtener mejor aceptación de éstos por parte de los usuarios finales. Así mismo, buscaba dar más importancia a usuarios al incluirlos como parte importante del proceso de ingeniería de software logrando así que al incorporar estas prácticas de UX se entreguen soluciones que les agreguen valor a sus procesos de negocio.

Considerando esta problemática existente en torno a la UX y las necesidades empresariales, se deriva este trabajo de investigación buscando la definición de la línea base de prácticas de UX que deben usarse durante el ciclo de vida de desarrollo de software para su incorporación específica en el proceso software de la empresa MVM. Las ventajas de esta integración están en que los roles ejecutan un solo proceso permitiendo un enfoque colaborativo, además de la adaptación a la cultura empresarial.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Los resultados del diagnóstico realizado de las prácticas que se llevaban a cabo en el ciclo de desarrollo de software en MVM y las prácticas de UX que tenían incorporadas, mostró que no había un proceso formal y que los modelos, técnicas, artefactos y métodos debían ser mejorados. Esto permitió corroborar la pertinencia de la presente investigación.

A través de talleres, se estableció el objetivo del proceso y se definió un proceso general basado en *Design thinking*, con unas etapas donde cada una de ellas tienen asociadas actividades y artefactos para llevarlas a cabo (Fig. 2). Dentro de los artefactos definidos incluyeron: repositorio de oportunidades y necesidades, *briefs* de tecnología y UX, cuestionarios de entrevistas, de investigación de usuarios y revisión con *stakeholders*, mapas de empatía, experiencia y estrategia del prototipado, creación de conceptos, árbol de navegación, *card sorting*, lineamientos para prototipado, testeo de usuarios, A/B

test, evaluación heurística. Adicionalmente se incorporaron estas etapas en el proceso de desarrollo de software (Fig. 3). Todos estos elementos forman la línea base de prácticas de UX para MVM.



Fig. 2. Etapas del proceso propuesto para MVM.

5. RESULTADOS

La validación de la línea base consistió en dos evaluaciones, una con expertos para la valoración de la línea base propuesta y otra, a través de un cuestionario, donde se revisó cómo se aplica la fase de Prototipado en un proyecto específico y qué evaluación hacen usuarios internos y externos de MVM a su aplicación.

Los resultados de la evaluación por parte de los expertos, de la línea base de prácticas de UX para MVM incorporada al proceso de ingeniería de software, muestran que en general es calificada como Alta o Media. Los expertos no emitieron votos en la escala de Baja. Estos resultados muestran por un lado que se considera que hay un fortalecimiento del proceso de ingeniería de software con la incorporación de esta línea base y que las etapas definidas en el proceso hacen un aporte importante al mismo. Así mismo, en la aplicación de las actividades de una de las fases definidas en la línea base a un proyecto específico indican que están satisfechos con los servicios de UX ofrecidos y que son útiles.

6. CONCLUSIONES

Por medio de la fase 1 de esta investigación donde se realiza la revisión de literatura se lograron determinar los conceptos de UX relevantes al contexto de MVM para ser aplicados y adaptados al ciclo de Ingeniería de software. La literatura destaca que debe haber un entendimiento de los procesos de Ingeniería y de UX para poder hacer la integración y que, en la tendencia ágil actual, la aplicación de las prácticas de UX no afecten lo que se busca, que es entregas en corto tiempo y con valor.

Teniendo como base los resultados del diagnóstico se construyó la línea base de prácticas de UX para MVM: definiendo alcance, fases que harían parte de ésta, actividades, instrumentos de apoyo a ser utilizados, diagramas de actividades y se incorporaron al proceso de desarrollo de software de MVM.

Posteriormente, se realizó la validación de la línea base de prácticas de UX definida para MVM, para lo cual se convocan expertos y se realiza un cuestionario para valorar las actividades de la Fase de prototipado en un proyecto específico. Los resultados de la validación mostraron que se ve un aporte que fortalece el proceso de desarrollo de software.

Finalmente, puede concluirse que los objetivos del trabajo de investigación aplicada se logran al haberse definido la línea base de prácticas de UX para MVM.

Derivado de la presente investigación, se propone realizar otra validación del proceso para recoger oportunidades de mejora, incluir métricas y evolucionar a un enfoque de experiencia del servicio.

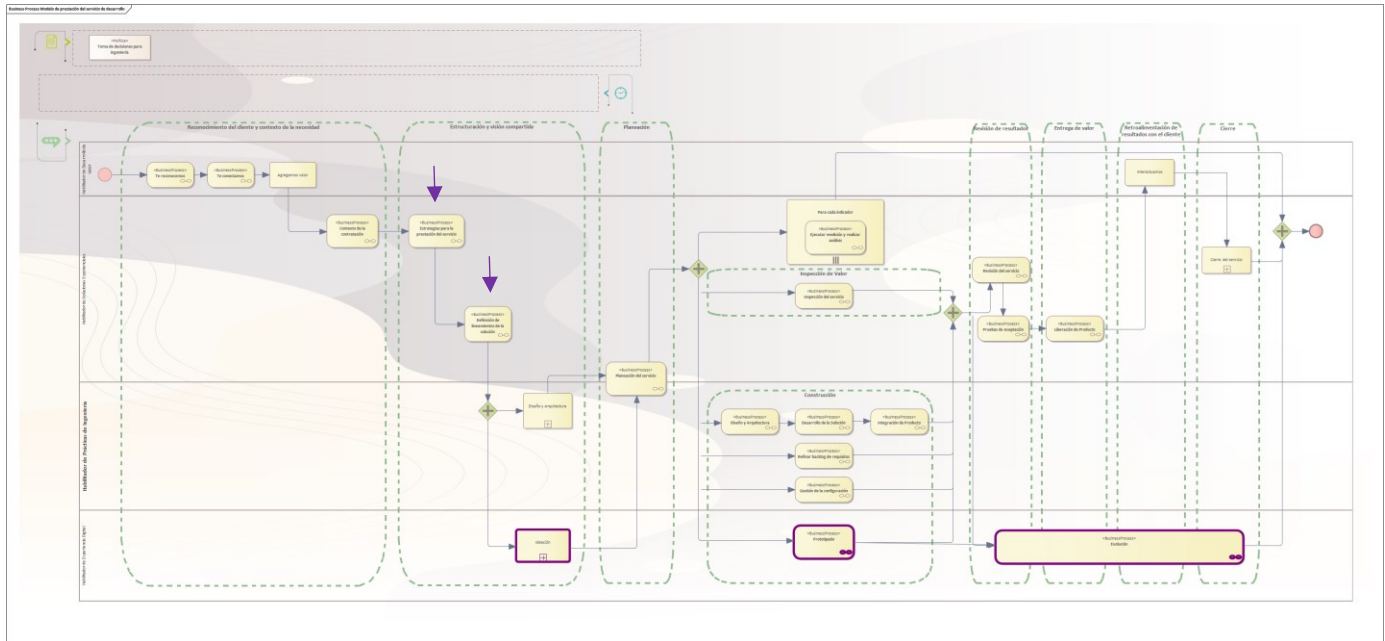


Fig. 3. Diagrama del proceso de desarrollo de software incorporando las etapas definidas del proceso de UX.

REFERENCES

- Abrahão, S., Juristo, N., Law, E. L. C., & Stage, J. (2010). Interplay between usability and software development. *Journal of Systems and Software*, 83(11), 2015–2018. <https://doi.org/10.1016/J.JSS.2010.05.080>
- Curley, M., & Adviser, M. E. (n.d.). *Open Innovation 2.0: A New Paradigm Bror Salmelin*.
- Fong Reynoso, C. (2008). El estudio de casos en la preparación de tesis de posgrado en el ámbito de la PYME. Conference: Estableciendo Puentes En Una Economía Global., ISBN 978-84-7356-556-1, 34.
- Hassenzahl, M. (2008). User experience (UX): Towards an experiential perspective on product quality. *ACM International Conference Proceeding Series*, 11–15. <https://doi.org/10.1145/1512714.1512717>
- Kashfi, P., Feldt, R., & Nilsson, A. (2019). Integrating UX principles and practices into software development organizations: A case study of influencing events. *Journal of Systems and Software*, 154, 37–58. <https://doi.org/10.1016/J.JSS.2019.03.066>
- Zaina, L. A. M., Sharp, H., & Barroca, L. (2021). UX information in the daily work of an agile team: A distributed cognition analysis. *International Journal of Human-Computer Studies*, 147, 102574. <https://doi.org/10.1016/J.IJHCS.2020.102574>

El impacto de la pandemia en la adquisición de habilidades y conocimientos técnicos: un análisis de las relaciones entre emociones, estrés y circunstancias cambiantes en el ITSZO enfocado a los alumnos de ISC

Oscar D. Vacío Loera*. José A. Flores Lara*
Verónica R. Arizpe Moreno*. Ernesto Valadez Rentería *

**Instituto Tecnológico Nacional de México campus Zacatecas Occidente (Tel: 433-104-1288; e-mail: antonioflores30@hotmail.com)*

Abstract: Este artículo enfatiza la importancia de la salud mental en los estudiantes como un factor crucial para enfrentar el período post pandemia, y cómo se puede mantener y mejorar esta salud mental a través del desarrollo de habilidades blandas. Estas habilidades blandas están muy relacionadas con el rendimiento académico de los estudiantes, ya que les permiten ser competentes y versátiles en diversas situaciones. Por lo tanto, es fundamental prestar atención a la salud mental y al desarrollo de habilidades blandas en los estudiantes para ayudarlos a enfrentar los desafíos actuales y futuros.

Keywords: pandemia, habilidades técnicas, emociones, estrés.

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia de COVID-19 causó el cierre de escuelas y universidades en todo el mundo, lo que afectó a un gran número de estudiantes. Nadie esperaba que la pandemia tuviera un impacto tan grande y negativo en la economía, la política y la sociedad.

En el ámbito educativo, las autoridades tomaron diferentes medidas para hacer frente a la situación, pero en general se trató de continuar con la educación mediante tareas encomendadas a los alumnos, el uso de materiales en sitios web y clases en línea, con el objetivo de mantener el plan de estudios en curso.

En vista de la nueva normalidad en la educación, las Instituciones de Educación Superior (IES) adoptaron enfoques multimodales (b-Learning, e-Learning e híbridos), lo que implica la necesidad de mejoras para lograr un aprendizaje flexible y transformar las formas de enseñanza y aprendizaje.

De hecho, algunos autores ya consideraban previamente que el modelo actual de las universidades debía transformarse o incluso desaparecer. (Mendiola 2020)

Este cambio repentino de la enseñanza presencial a la enseñanza virtual, ha sido motivo de análisis y reflexión. Tanto los profesores como los estudiantes no estaban preparados para la transformación que la sociedad estaba a punto de experimentar, lo que ha llevado a replantear los métodos y estrategias de enseñanza para adaptarse a la nueva realidad. (Poderti, A 2020)

La formación profesional se enfoca principalmente en el desarrollo del conocimiento técnico y habilidades prácticas. Por lo general, los módulos de ética, psicología y filosofía solo buscan proporcionar conocimientos generales y no ofrecen una guía de comportamiento ni un método para desarrollar habilidades sociales. Esto priva a los estudiantes de las habilidades sociales necesarias para enfrentar los desafíos de la vida y del mundo laboral.

En el ámbito laboral, se les da mayor importancia a las llamadas "habilidades blandas", que son significativas para el desempeño en el trabajo, tales como comunicación, gestión del tiempo, negociación, orientación a resultados, gestión de conflictos, manejo del estrés, flexibilidad, empatía, trabajo en equipo, pensamiento crítico, control de emociones. (Pérez 2022)

En la presente investigación, se analizó la influencia de las habilidades o conocimientos técnicos adquiridos durante el periodo de confinamiento en las reacciones, emociones y estrés de los estudiantes inscritos a la carrera de Ing. en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente, así como en los cambios de circunstancias propias de la pandemia.

Para llevar a cabo esta investigación, se plantearon las siguientes hipótesis:

H1: Las habilidades o conocimientos técnicos adquiridos durante la pandemia tienen que ver con las reacciones,

emociones y estrés de los estudiantes de Ing. en Sistemas Computacionales.

H2: Los cambios de circunstancias en la pandemia influyen en la adquisición de nuevas habilidades y conocimientos técnicos en los estudiantes de Ing. en Sistemas Computacionales.

2. METODOLOGÍA

Para la comprobación de las hipótesis planteadas, se aplicó una encuesta a 51 estudiantes inscritos a la carrera de Ing. en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente. Dichos estudiantes estuvieron trabajando en sus actividades académicas en línea durante el periodo de confinamiento y experimentaron el respectivo cambio de circunstancias personales, profesionales y académicas.

En la Tabla 1 se muestra la ficha técnica para la investigación.

Tabla 1. Ficha técnica

Indicador de Estudio	Descripción
Población de estudio	Alumnos inscritos al programa de Ing. en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
Ámbito Geográfico	Nacional
Tamaño de la población	58
Tamaño de la muestra	51
Periodo de realización del trabajo de campo	Enero - Marzo 2023

El instrumento que se aplicó a los 51 alumnos que conforman la muestra del programa académico de Ing. en Sistemas Computacionales consta de tres bloques. El primero de ellos, con 4 ítems, tiene que ver con habilidades o conocimientos técnicos; el segundo mide las reacciones, emociones y estrés de los estudiantes mediante 20 ítems y el tercer bloque mide otros cambios de circunstancias con 6 ítems. Se seleccionaron estos bloques ya que institucionalmente se requieren medir los indicadores que describen, con el fin de implementar nuevas estrategias que permitan una mejora y actualización en las actividades académicas. Todos los ítems de los bloques descritos son medidos con Escala Likert 1 – 5, en donde 1 indica “completamente en desacuerdo” y 5 indica “completamente de acuerdo” ya que, de acuerdo a Ibáñez (2022), la Escala Likert 1 - 5 permite medir actitudes y conocer el grado de aceptación sobre una determinada afirmación a través de cuestiones, con una escala ordenada y unidimensional

como respuesta. Dicho instrumento se puede revisar a detalle en el Apéndice A.

Previo a la aplicación del instrumento, se hizo una prueba piloto con la intención de identificar ítems que no fueran congruentes con la información que se pretendía obtener y determinar la confiabilidad de las respuestas. De igual manera, se realizaron pruebas de confiabilidad por medio del coeficiente de Alfa de Cronbach, el cual es de 0.752. Este valor indica que el instrumento se considera confiable, ya que según Maese Núñez, Alvarado Iniesta, Valles Rosales, y Báez López (2016), la consistencia interna de un cuestionario considera que el valor mínimo satisfactorio para este coeficiente es de 0.7.

Para la aplicación de la encuesta, se utilizó la herramienta Google Forms y se compartió el enlace con los grupos del programa académico. Con una población de 58 estudiantes inscritos, el tamaño de muestra resultó ser de 51 estudiantes con un 95% de confianza y 5% de error.

Según los datos recabados de la encuesta, se tiene que las edades de los estudiantes de Ing. en Sistemas Computacionales van de los 18 a los 25 años que a la fecha de aplicación de la encuesta se encontraban estudiando el 2º, 4º, 6º, 8º y 10º semestre. Se contó con la participación de 23 estudiantes de sexo femenino, 26 estudiantes de sexo masculino y 2 estudiantes que prefirieron no especificar su género.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un análisis multivariante de datos a través de la técnica estadística de Regresión Lineal, bajo el método de pasos sucesivos mediante el software IBM SPSS V26 con el fin de probar las hipótesis de investigación. (Ferrán 1996) (George y Mallery 2003) En la Tabla 2 se presenta el resumen del primer modelo, en el que se obtuvo un valor de R de 0.580 y una R^2 de 0.337, lo que indica que las reacciones, emociones y estrés de los estudiantes está relacionada en un 58% con las nuevas habilidades o conocimientos técnicos adquiridos en la pandemia y la estructura del modelo teórico se explica en un 37.7%

Tabla 2. Resumen del primer modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	.580 ^a	.337	.323	.625	2.194

a. Predictores: (Constante), Reacciones, emociones y estrés de los estudiantes

b. Variable dependiente: Nuevas habilidades o conocimientos técnicos

En la Tabla 3 se presenta el resumen del segundo modelo, en el que se obtuvo un valor de R de 0.440 y una R^2 de 0.193, lo que indica que los cambios de circunstancias durante la pandemia están relacionados en un 44% con las nuevas habilidades o

conocimientos técnicos adquiridos y la estructura del modelo teórico se explica en un 19.3%.

Tabla 3. Resumen del segundo modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	.440 ^a	.193	.177	.689	2.230

a. Predictores: (Constante), Otros cambios de circunstancias

b. Variable dependiente: Nuevas habilidades o conocimientos técnicos

Con base en los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente a partir de las hipótesis planteadas:

Con respecto a la hipótesis H1, los resultados obtenidos en la Tabla 2 ($\beta=0.580$, $p<0.05$) indican que las reacciones, emociones y estrés de los estudiantes influyeron de manera positiva en las nuevas habilidades o conocimientos técnicos adquiridos en la pandemia en un 58%, por lo que se acepta H1.

Para la hipótesis H2, los resultados obtenidos en la Tabla 3 ($\beta=0.440$, $p<0.05$) indican que los cambios de circunstancias en la pandemia tuvieron un efecto positivo en las nuevas habilidades o conocimientos técnicos adquiridos durante el mismo periodo, influyendo en un 44%, por lo que se acepta H2.(Joe, 1997;Pita, 1996)

Finalmente, cabe resaltar que, con base en los resultados de las correlaciones expuestas en las Tablas 1 y 2, las reacciones, emociones y estrés de los estudiantes, así como los cambios de circunstancias, influyeron en la adquisición de nuevas habilidades o conocimientos técnicos. Es decir, factores presentados como ítems en el instrumento tales como la preocupación de perder el semestre, la posibilidad de aprender menos, no ir a clases presenciales, la dificultad para comprender las clases, tener que trabajar, apoyar en las labores del hogar, servicios de internet regulares, problemas de conexión, entre otros, influyeron en el desarrollo de nuevas habilidades en el uso de las TIC, en el uso del smartphone como herramienta de trabajo, además de la utilización de nuevas herramientas de comunicación para la realización de las actividades.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación, por medio de un análisis de regresión lineal con la ayuda del software estadístico IBM SPSS V26, demuestran notoriamente que las reacciones, emociones, estrés de los estudiantes y los cambios de circunstancias en la pandemia influyeron de manera positiva en la adquisición de nuevas habilidades o

conocimientos técnicos en el ámbito de las TIC, ya que al suspenderse las actividades presenciales en las instituciones educativas, se realizaron todas las actividades en línea y a distancia.

Esta investigación resultó ser un ejercicio interesante, ya que más allá de medir lo estrictamente cuantitativo, se midió el sentir de los estudiantes durante el periodo de confinamiento. Con los resultados obtenidos, se tiene una referencia clara de las necesidades de los estudiantes y sus aptitudes para ciertas habilidades blandas, así como el conocimiento de las plataformas que se pueden utilizar en un futuro para desarrollar las distintas actividades académicas. Esto aunque las actividades ya se realicen al 100% de manera presencial en el Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.

REFERENCIAS

- Álvarez Mendiola, G. (2020). Covid-19. Cambiar de paradigma educativo, COMIE, México (2020).
- Ferrán, M. (1996), SPSS para Windows.Programación y análisis estadístico. Madrid.Editorial McGraw-Hill.
- George, D. y Mallery, P. (2003). SPSS forWindows step by step: A simple guide and reference. 11.0 update (4thed.). Boston: Allyn & Bacon.
- Ibáñez López F. J. (2022). Trabajar con Likert. En Maurandi-López, A. y González-Vidal, A. (Ed). *Análisis de datos y métodos estadísticos con R* (503-532). Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia.
- Justiniano de Pérez, S. B. (2022). La necesidad de desarrollar habilidades blandas en la formación profesional. *Revista Tecnológica*, 2022, num. 15, 58-60.
- Joe, H. (1997). Multivariate models and dependence concepts. Chapman andHall/CRC, Boca Ralton. New York, 395p.
- Maese Núñez, J. D., Alvarado Iniesta, A., Valles Rosales, D. J., Báez López, Y. A. (2016). Coeficiente alfa de Cronbach para medir la fiabilidad de un cuestionario difuso. *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica*, 59(1), 146-156.
- Pita, F.S. (1996). Correlación frente a la causalidad. *Jano* 4, 59-260.

Apéndice A. ENCUESTA APLICADA A LOS ESTUDIANTES DE ING. EN SISTEMAS COMPUTACIONALES.

Bloque 1. Nuevas habilidades o conocimientos técnicos

Por favor comparte si consideras que adquiriste nuevos conocimientos o habilidades técnicas.

1. Tuviste que desarrollar nuevas habilidades en el uso de TIC

2. Antes del confinamiento ya usabas estas herramientas de comunicación para actividades de la escuela (teléfono, WhatsApp, Meet, Zoom, Correo, otras)
3. Durante el confinamiento tuviste que empezar a usar estas herramientas de comunicación para actividades de la escuela (teléfono, WhatsApp, Meet, Zoom, Correo, otras)
4. Gracias al Internet en mi teléfono (smartphone) pude resolver muchas de las actividades
2. Tuviste que apoyar más en labores del hogar
3. Perdiste familiares cercanos que afectaron tu rendimiento
4. Tuviste familiares muy enfermos y eso te distrajo de tus responsabilidades académicas
5. Te enfermaste y disminuyó tu desempeño académico
6. El servicio de Internet no es bueno en tu colonia y tuviste problemas de conexión

Bloque 2. Reacciones, emociones y estrés de los estudiantes. (Likert).

Por favor comparte tus reacciones al enterarte de la pandemia y de la suspensión de labores presenciales, es decir del confinamiento.

1. Te preocupaste por la posibilidad de perder el semestre
2. Te preocupó la posibilidad de aprender menos
3. Estabas convencido de que no sería lo mismo sin la interacción con el profesor
4. Estabas convencido de que te haría falta convivir con tus compañeros de escuela
5. Te preocupó la falta de equipo de cómputo en tu casa para realizar tus actividades
6. Te preocupó la falta de acceso a Internet en tu domicilio para atender tus actividades
7. Fue difícil adaptarte a la forma de trabajo
8. Fue complicado entender lo que explicaban los maestros
9. Resultó difícil entender las actividades que pedían los maestros
10. Sentías mucha motivación para seguir adelante con la carrera
11. Te deprimía no estar yendo a clases presenciales
12. Te angustiaba o agobiaba la nueva forma de trabajo
13. La nueva forma de trabajo fue emocionante
14. Estuviste a punto de abandonar la carrera
15. Sentiste apoyo de tu familia
16. No dominabas las tecnologías necesarias para continuar bien el proceso
17. Te emocionó pasar más tiempo con tu familia
18. Te preocupó el gasto económico de trabajar desde casa
19. Te estresaron los cambios en todo el proceso debido al COVID-19
20. El ambiente en tu casa no era el ideal para el aprendizaje

Bloque 3. Otros cambios de circunstancias

Por favor comparte si alguna otra circunstancia aplicó a tu caso

1. Tuviste que trabajar afectando tu tiempo de dedicación al aprendizaje

Estimación De Biomasa Con Termografía Pulsada Lock-In: Aplicado En Plantas De Fresa

Rodrigo A. Ocaña-Sánchez * Madaín Pérez-Patricio **
Antonio Osuna-Coutiño ***

* Tecnológico Nacional de México, 29000 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; ocasan@outlook.es; (R.A.O.-S.)

** Tecnológico Nacional de México, 29000 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; madain.pp@tuxtla.tecnm.mx; (M.P.-P.)

*** Computer Science Department, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), 72840 Pueb., Mexico; osuna@inaoe.mx; (A.O.-C.)

Resumen

Estimar la biomasa en plantas brinda información suficiente para identificar problemas como la falta de nutrientes, riego insuficiente y crecimiento en etapas tempranas, lo que permite tomar medidas correctivas para el buen desarrollo de las plantas (Bracmort and Gorte, 2009). En este trabajo se propone una metodología basada en algoritmos de visión por computador (CV) y termografía pulsada lock-in (PT Lock-In) para estimar la biomasa de las plantas. Para validar la precisión del algoritmo se utilizan plantas de fresa (*Fragaria x ananassa*). La metodología consiste en 4 etapas; análisis del perfil térmico de la muestra, extracción de la zona de interés, reconstrucción 3D y estimación de biomasa. El algoritmo diseñado funciona de manera correcta, la metodología aplicada tiene margen de mejora, por lo que se puede aplicar para obtener una estimación de la biomasa en otra variedad de plantas a partir de la reconstrucción 3D.

Keywords: Diseño lógico, diseño físico e implementación de sistemas informáticos integrados, algoritmos de visión artificial, termografía pulsada lock-in, mapas de profundidad, estimación de biomasa.

1. INTRODUCCIÓN

El avance en tecnologías ha permitido desarrollar técnicas de evaluación no destructivas (Non-Destructive Evaluation "NDE"), estas permiten obtener datos del espécimen de estudio sin entrar en contacto directo. Entre las técnicas NDE más utilizadas y de bajo costo se encuentran los sensores RGB-D. Debido a los inconvenientes en el uso de sensores RGB-D en vegetación delgada (Liu et al., 2021); (Taheri et al., 2022), se opta como alternativa el uso de la termografía pulsada, esta técnica se ha implementado para calcular el estrés hídrico en plantas (Cruz et al., 2020), detectar presencia de defectos internos y externos en hojas, frutas y vegetales (Shakeel et al., 2022); (Kuzu et al., 2018); (Patel et al., 2023), dando buenos resultados, por lo que es una técnica con un margen de mejora e investigación. Hasta la fecha no se han encontrado estudios relacionados con estimación de biomasa en plantas (peso de materia viva) aplicando la termografía pulsada. El objetivo principal del estudio, es demostrar que con el procesamiento de imágenes térmicas obtenidas mediante

la termografía pulsada lock-in, se puede estimar la biomasa de las plantas y obtener el modelo 3D. Los objetivos específicos: 1) Analizar el comportamiento térmico de las hojas presentes en la planta; 2) Reconstruir el modelo 3D de la planta; 3) Plantear un algoritmo para estimar la cantidad de biomasa.

2. METODOLOGÍA

Para las muestras se utilizan ocho plantas de fresa. Los videos tienen un formato estricto con una duración de 12 minutos, teniendo un total de 24 videos a 30 FPS, 3 videos por planta. Al comenzar la grabación se encienden las 4 lámparas de halógeno para observar el calentamiento de la planta. El algoritmo funciona de manera que; se seleccionan conjuntos de hojas a diferentes alturas, a continuación se genera una gráfica para observar el comportamiento térmico de cada conjunto de hojas, se obtiene el valor máximo (P_{Max}) y el valor mínimo (P_{Min}) de cada conjunto para extraer la zona de interés mediante la ec.1.

$$FR_{(i,j)} = \begin{cases} 0 & \text{Si } (FI_{(i,j)} = FF_{(i,j)}) \\ 0 & \text{Si } (FF_{(i,j)} - FI_{(i,j)}) \leq P \\ FF_{(i,j)} & \text{Si } (FF_{(i,j)} - FI_{(i,j)}) \geq P \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

P es el valor máximo del conjunto más alejado de la cámara (P_{Max}), FI es el frame inicial, FF es el frame final, FR es el frame resultante del filtro aplicado, el subíndice indica la posición del píxel (i, j) .

Con las ec.2 a 4 del modelo de cámara estenopeica, se realiza la reconstrucción 3D de la planta calculando las coordenadas de cada punto en el espacio para posteriormente ubicarlos en una gráfica 3D (Fig.1).

$$Z = \frac{k \cdot z}{255} \quad (2)$$

$$X = \frac{x \cdot Z}{f} \quad (3)$$

$$Y = \frac{y \cdot Z}{f} \quad (4)$$

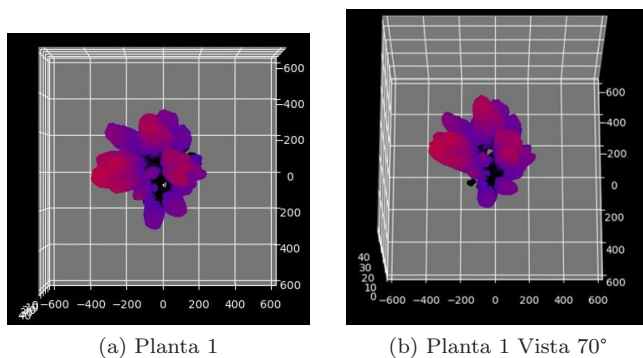


Figura 1. Reconstrucción 3D

Finalmente se estima la biomasa con la ec.5 aplicando un factor de ganancia G obtenida de manera empírica, la cual se toma a partir de las mediciones manuales realizadas. El punto principal de esta etapa es establecer una relación entre la cantidad de área ocupada por la hoja y el peso en gramos, esto se obtiene mediante un escalamiento (G) para tener el tamaño equivalente a las dimensiones reales de las hojas.

$$B_N = \{+1 \cdot G, \quad AP_{(i,j)} \geq R \quad (5)$$

Donde:

B_n es la biomasa del nivel, G la ganancia aplicada para la proporción, AP es la altura del píxel (ec.2) y R es el valor mínimo en la altura de cada conjunto.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La estimación de biomasa obtenida mediante el algoritmo diseñado entrega pesos cercanos a los tomados manualmente como se observa en la Tabla 1. La diferencia entre los pesos reales y los calculados por el algoritmo, se deben

a las variaciones en la altura y al factor de ganancia G . Las variaciones de altura vienen dadas por la no uniformidad en el proceso de termografía pulsada, de igual manera es necesario realizar un estudio más detallado para encontrar los valores óptimos del factor de ganancia G . Si bien, existe un margen considerable de mejoras en el algoritmo planteado, la metodología diseñada proporciona una perspectiva de como trabajar con esta técnica para realizar la estimación de biomasa en plantas.

Tabla 1. Estimación De Biomasa

Planta	Peso Real De La Planta (Gramos)	Peso Estimado Mediante El Algoritmo (Gramos)	Diferencia De Pesos Obtenidos (Gramos)
1	2.8	2.6489	0.1511
2	3.2	2.7417	0.4583
3	2.9	2.7588	0.1412
4	3.4	3.0021	0.3979
5	4.3	3.9049	0.3951
6	4.7	4.2087	0.4913
7	3.5	2.9842	0.5158
8	3	2.4245	0.5755

REFERENCIAS

- Bracmort, K. and Gorte, R.W. (2009). Biomass: comparison of definitions in legislation. Congressional Research Service, Library of Congress.
- Cruz, J.V., Arias, G.Q., and Caita, J.F.A. (2020). Termografía infrarroja para el manejo hídrico del cultivo de fresa (fragaria x ananassa duch) bajo cubierta. *Temas agrarios*, 25(1), 35–47.
- Kuzy, J., Jiang, Y., and Li, C. (2018). Blueberry bruise detection by pulsed thermographic imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 136, 166–177.
- Liu, W., Li, Y., Liu, J., and Jiang, J. (2021). Estimation of plant height and aboveground biomass of toona sinensis under drought stress using rgb-d imaging. *Forests*, 12(12). doi:10.3390/f12121747. URL <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/12/1747>.
- Patel, K.K., Goyal, S., and Patel, Y.K. (2023). Image processing for food safety and quality. *Novel Technologies in Food Science*, 451–478.
- Shakeel, Q., Bajwa, R.T., Rashid, I., Aslam, H.M.U., Iftikhar, Y., Mubeen, M., Li, G., and Wu, M. (2022). Concept and application of infrared thermography for plant disease measurement. *Trends in Plant Disease Assessment*, 109–125.
- Taheri, H., Gonzalez Bocanegra, M., and Taheri, M. (2022). Artificial intelligence, machine learning and smart technologies for nondestructive evaluation. *Sensors*, 22(11). doi:10.3390/s22114055. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4055>.

QLERR (Quality Learning Resources Reader) un sistema para la evaluación de recursos de aprendizaje

Erick F. Castillo Badillo *, Olivia G. Fragoso-Díaz *, Juan Carlos Rojas Pérez*, Blanca Dina Valenzuela Robles*.

Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos México (Tel: +52 777 1554687; e mail: m21ce056@cenidet.tecnm.mx, olivia.fd@cenidet.tecnm.mx, juan.rp@cenidet.tecnm.mx, blanca.vr@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: En este artículo se presenta QLERR, un sistema web que evalúa la reusabilidad, legibilidad y correctitud de los recursos de aprendizaje, mediante tres modelos de calidad cada uno enfocado a evaluar un atributo de calidad en específico. Además, QLERR cuenta con un marco de servicios web tipo SOAP que proporciona funciones estadísticas descriptivas, y gráficos para analizar los resultados de las evaluaciones. Este artículo ofrece ejemplos prácticos de 5 evaluaciones realizadas a recursos de aprendizaje y explica cómo este sistema puede ayudar a los creadores de RA a mejorar la calidad de sus recursos.

Palabras Clave: Recursos de aprendizaje, Calidad, Mejora continua, Reusabilidad, Correctitud, Legibilidad.

1. INTRODUCCION

Según (López, 2009) los recursos de aprendizaje (RA) son imágenes, fotografías, textos, multimedia (audio y video), software instruccional y cursos, entre muchos otros tipos de materiales digitales con fin educativo. En estos tiempos de la era digital ya existen muchas herramientas capaces de evaluar la calidad de los RA, el problema con estas herramientas es que no indican el camino hacia la mejora continua del recurso. El enfoque de este trabajo es evaluar la calidad de los RA, con respecto a los atributos de: Legibilidad, Reusabilidad, y Correctitud. Donde el objetivo de evaluar un RA es identificar los defectos basándose en un conjunto de atributos y sub-atributos, para así poder iniciar el camino a la mejora continua, proceso que consiste en realizar la evaluación de los RA y aplicar cambios a los mismos de manera constante, facilitando el trabajo a aquellos que necesiten mejorar la calidad de sus recursos. En este trabajo se propone el sistema *QLERR (Quality Learning Resources Reader)*, la cual tiene por objetivo apoyar a todos aquellos profesores, catedráticos u otros creadores de RA, a mejorar sus recursos.

2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA QLERR.

Como se muestra en la Fig. 1, la arquitectura del sistema QLERR se compone de tres elementos principales. El primer componente son los sistemas externos, que incluyen el "Sistema externo reusabilidad," "Sistema externo legibilidad" y "Sistema externo correctitud". Estos sistemas brindan servicios web que evalúan el nivel de reusabilidad (Salinas, 2017), legibilidad (Pérez, 2021) y correctitud de un RA. El segundo componente es un marco de servicios estadísticos que proporciona al sistema funciones de estadística, como la media, la moda, la mediana, la desviación estándar, el coeficiente de correlación, el rango y la varianza. Las funciones se representan mediante gráficas que permiten comparar y analizar los valores de los RA. El tercer componente son las bases de datos, que se enfocan en guardar los resultados de las evaluaciones de cada atributo de calidad.

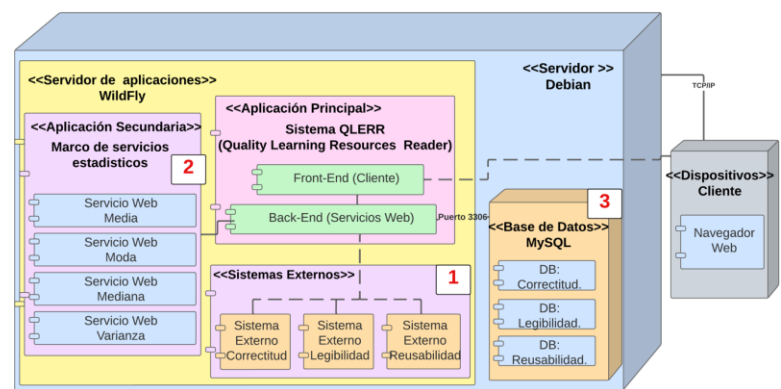


Fig. 1. Arquitectura del sistema QLERR.

3. PRUEBAS Y CONCLUSIONES

Legibilidad: La legibilidad evalúa la facilidad de lectura y comprensión de un RA, considerando sub-atributos como tipo y tamaño de letra, color de fondo y de letra, idioma y orientación del texto. La suma de las ponderaciones de todos estos sub-atributos conforman el atributo de legibilidad, representado en la ecuación (1).

Reusabilidad: El atributo de reusabilidad evalúa la facilidad de reutilización de un RA en diferentes situaciones de aprendizaje. Se compone de sub-atributos como la usabilidad, que se refiere a su facilidad de uso; informatividad, que se refiere a la calidad y relevancia del contenido; y disponibilidad, que se refiere a si el RA está disponible para el usuario o no. La reusabilidad se calcula usando ponderaciones de los sub-atributos, empleando la ecuación (2).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \times 100 \quad (2)$$

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (1)$$

Se evaluó la reusabilidad R% y legibilidad L% de 30 recursos utilizando las ecuaciones en (1) y (2). En la Tabla 1 se describe un resumen de 5 evaluaciones.

Tabla 1. Tabla resumen de evaluaciones.

RESUMEN DE EVALUACIONES.			
Recurso	Descripción	L%	R%
Recurso 1	Este recurso es un documento en formato .pdf de 10 hojas, de un tamaño de 66.4 KB, su contenido es sobre lenguajes de programación.	62.90	63.67
Recurso 2	Este recurso es un documento en formato .pdf de 15 hojas, de un tamaño de 124 KB, su contenido es sobre la enseñanza mediante medios electrónicos.	67.81	72.92
Recurso 3	Este recurso es un documento en formato .pdf de 9 hojas, de un tamaño de 272 KB, su contenido es sobre programación el lenguaje C++.	46.92	57.77
Recurso 4	Este recurso es un documento en formato .pdf de 6 hojas, de un tamaño de 173 KB, su contenido es sobre programación orientada a objetos.	48.00	57.85
Recurso 5	Este recurso es un documento en formato .pdf de 9 hojas, de un tamaño de 2.38 MB, su contenido es sobre redes neuronales.	50.92	79.58

Las pruebas muestran que los RA tienen mejores resultados en reusabilidad que en legibilidad debido a errores comunes como fondos en colores poco claros, mala orientación del texto, tipos de letra poco formales, y colores de letra poco apreciables lo que afecta la legibilidad y en consecuencia la reusabilidad del recurso también se ve afectada. Si el nivel de reusabilidad mínimo deseado por un usuario fuera de al menos un 80%, en ninguno de los casos se alcanza.

Nivel de reusabilidad de los recursos de aprendizaje

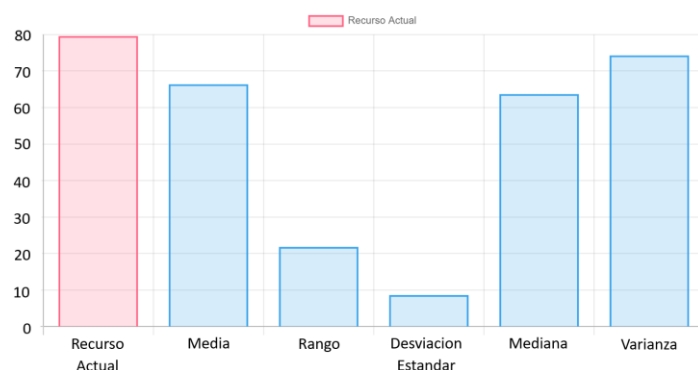


Fig. 2. Análisis estadístico descriptivo de reusabilidad.

Finalmente, en la grafica de la Fig. 2 se muestra el análisis estadístico descriptivo donde se puede apreciar que el recurso actual (recurso5), tiene un nivel de reusabilidad por encima de la media, con un valor superior del 13.22%, indicando así que sobrepasa el nivel promedio de reusabilidad de los RA evaluados. Además de esto el análisis estadístico arrojó que el rango del conjunto de valores evaluados es de 21.81, lo que indica la diferencia entre el valor máximo (79.58) y el valor mínimo (57.85). Como el valor del recurso5 es el más alto dentro del conjunto de valores evaluados, esto sugiere que el recurso es de alta calidad en comparación con otros recursos evaluados. El rango del conjunto de valores puede ser útil para que los usuarios conozcan los valores máximos y mínimos que deben superar para mejorar la calidad de sus recursos. También se identificó que el valor de la mediana del conjunto de datos históricos es de 63.67 indicando así que este valor es el punto medio del conjunto de datos registrados, este valor medio sirve como referencia al usuario para saber si su RA tiene un nivel de calidad cercano al valor máximo o mínimo del conjunto de datos históricos. De igual manera la desviación estandar es de 8.61, esto sugiere que la mayoría de los recursos evaluados presentan un nivel de reusabilidad muy por encima de la media, esto puede ser muy beneficioso para el usuario porque así se puede conocer si los recursos están mejorando su calidad en algún atributo en particular. Por último, el análisis de varianza del conjunto de valores evaluados, es de 74.27, lo que indica una alta dispersión de los valores de reusabilidad en la muestra poblacional. Es decir, algunos RA pueden tener un nivel de reusabilidad significativamente superior a la media, mientras que otros RA pueden tener un nivel de reusabilidad inferior. En este caso solamente los recursos 3 y 4 tienen un nivel de reusabilidad inferior de la media, mientras que el resto de los recursos presentan un nivel de reusabilidad superior a la media. Esto es muy útil para el usuario pues así puede identificar qué aspectos específicos del recurso necesitan mejoras para aumentar su nivel de reusabilidad y calidad en general. Además, pueden examinar los recursos que tienen un nivel de reusabilidad superior a la media, para aprender de sus fortalezas y aplicarlas a sus propios recursos. Adicionalmente, el empleo de las medidas estadísticas en este caso puede apoyar en la generación de recomendaciones y pautas para la construcción de un RA de calidad.

REFERENCIAS

- López Guzmán, C., & García-Peñalvo, F. J. (2009). Repositorios de objetos de aprendizaje: bibliotecas para compartir y reutilizar recursos en los entornos e-learning.
- Salinas Román, (2017), Marco Orientado a Objetos para Medir la Calidad en Servicios Web de Aprendizaje, Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México Campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.
- Pérez Rodríguez, (2021), Marco de servicios para medición de la calidad de formato de recursos de aprendizaje en Servicios Web, Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México Campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.

Comparación de los recursos de tiempo y memoria en la ejecución de una tarea de preprocesamiento de textos

Yessenia Díaz Álvarez*, María de Lourdes Velasco Vázquez**, Virginia Lagunes Barradas*, Miguel Hidalgo Reyes*, Julia Aurora Montano Rivas**

*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Xalapa (ITSX), Subdirección de Posgrado e Investigación, Maestría en Sistemas Computacionales, Xalapa, Veracruz, México

**Laboratorio de Investigación y Asesoría Estadística (LINAIE), Facultad de Estadística e Informática (FEI) Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

217000013@itsx.edu.mx, lovelasco@uv.mx, virginia.lb@xalapa.tecnm.mx,
miguel.hidalgo@itsx.edu.mx, julmontano@uv.mx

Resumen: La minería de textos es un proceso encargado de extraer información proveniente de diversas fuentes de datos escritos. Sin embargo, previo a ello, deben llevarse a cabo diversas tareas de preprocesamiento, las cuales consumen recursos computacionales tales como tiempo y memoria. El presente artículo muestra el análisis comparativo de dos bibliotecas de Python, PyPDF2 y pdfplumber, utilizadas para llevar a cabo una de las fases de preparación de textos, la transformación de archivos pdf a txt. El diseño de los experimentos realizados consistió en definir las variables respuesta, tiempo (milisegundos) y memoria (bytes), los dos niveles de un solo factor, el tipo de biblioteca y como unidad de estudio, los nueve documentos referentes a leyes ambientales mexicanas. Se comparó el tiempo y memoria de las bibliotecas PyPDF2 Y Pdfplumber mediante la prueba de rangos con signos de Wilcoxon. Los resultados mostraron diferencias en los tiempos de procesamiento de las leyes ($p < 0.01$), con un valor de mediana de 5.43 para la biblioteca PyPDF2 y de 58.26 para la biblioteca pdfplumber. Con relación a la memoria utilizada no se presentaron diferencias.

Keywords: minería de textos, tiempo, memoria, transformación, Prueba de Wilcoxon.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo analizar estadísticamente el consumo de tiempo y memoria en una tarea de la fase de preparación de datos correspondiente a *CRISP-DM* (*Cross Industry Standard Process for Data Mining*), el cual es un modelo de proceso para el desarrollo de proyectos de minería de datos (Chapman et al., 2000).

La tarea de preprocesamiento a analizar consiste en la conversión de archivos correspondientes a leyes ambientales mexicanas en formato pdf a texto plano, en donde el interés radica en medir los recursos de tiempo (milisegundos) y memoria RAM (bytes), los cuales representan las variables respuesta de este estudio.

El objetivo de llevar a cabo esta transformación radica en el hecho de comenzar un proceso de preparación de datos para generar uno o más modelos predictivos. El corpus generado, a partir de la fase de preprocesamiento, podría aplicarse al análisis de las políticas públicas en materia ambiental.

El proceso experimental para este estudio, fue el propuesto por (McGeoch, 2012), el cual está dividido en dos grandes fases, la planeación y la ejecución.

- 1 Planificación: Consiste en la formulación de preguntas y en la selección de herramientas y en el diseño del experimento.
- 2 Ejecución: La realización de experimentos se alterna con el análisis de datos. Los pasos individuales pueden llevarse a cabo en diferente orden y, a veces, se omiten.

1.1 Selección de los documentos de texto

Los documentos legislativos de México están formados por leyes generales y federales, reglamentos, normas oficiales, constituciones y leyes estatales, entre otros. Además, México participa en poco más de 70 tratados internacionales enfocados en la Protección del Patrimonio Biocultural.

Dada la cantidad y diversidad de leyes en materia ambiental, éstas requieren ser revisadas y analizadas para detectar posibles incoherencias, deliberadas o no, y así proteger a los ecosistemas frente a riesgos y amenazas. Para este importante reto, se debe

recurrir a la minería de textos y al procesamiento de lenguaje natural, áreas que utilizan las técnicas y los algoritmos de la inteligencia artificial (Hidalgo, 2018).

De este conjunto de leyes, se seleccionaron 9 leyes ambientales mexicanas de ámbito federal, las cuales han sido elegidas por un grupo de expertos en política ambiental mexicana, por ser las más relevantes.

Éstos se encuentran disponibles en formato pdf y doc, en la página web www.diputados.gob.mx de acceso libre y son:

1. LAN: Ley de Aguas Nacionales
2. LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
3. LFBOGB: Ley Federal de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados
4. LDRS: Ley de Desarrollo Rural Sustentable
5. LGCC: Ley General de Cambio Climático
6. LGPAS: Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentable
7. LGVS: Ley General de Vida Silvestre
8. LGDFS: Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable
9. LGPGIR: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos

Los documentos de ley se encuentran representados principalmente por textos cuyas diferencias radican en el número de páginas, tamaño de los enunciados, uso de diferente tipografía en los párrafos, incorporación de pies de página, encabezados e imágenes, entre otros.

1.2 Herramientas tecnológicas

Para procesar y analizar los datos, se hace uso de dos lenguajes de programación ampliamente utilizados en el área de ciencia de datos.

En primer lugar, Python que es un lenguaje interpretado de alto nivel, cuya filosofía hace hincapié en la legibilidad de su código. Está desarrollado bajo una licencia de código abierto, lo que lo hace de libre uso y distribución (Python, 2021).

Se eligieron específicamente las bibliotecas PyPDF2 y Pdfplumber porque son bibliotecas compatibles con el lenguaje Python las cuales son capaces de dividir, fusionar, recortar y transformar el texto que está contenido en el archivo PDF. Además estas bibliotecas se enfocan en el texto contenido en tablas, figuras, logotipos, y todos aquellos símbolos que no son caracteres no representan un obstáculo para que la biblioteca consiga esta extracción de texto.

En contraste, las bibliotecas de Python llamadas Fitz y PDFMiner no obtuvieron de manera satisfactoria esta extracción.

Las bibliotecas específicas utilizadas para la tarea de transformación de pdf a txt son:

- PyPDF2 es una biblioteca de Python de código abierto y gratuita capaz de dividir, fusionar, recortar y transformar las páginas de los archivos PDF. Ésta puede agregar datos personalizados, opciones de visualización y contraseñas a archivos PDF, así como recuperar texto y metadatos (PyPDF2, 2022). Se programaron 55 líneas de código en esta biblioteca para esta tarea.
- Pdfplumber es una biblioteca gratuita de Python de código abierto capaz de extraer texto de cualquier página dada. También puede intentar preservar el diseño de un texto, así como identificar las coordenadas de las palabras (Github, 2022). Se programaron 54 líneas de código en esta biblioteca para esta tarea.

En segunda instancia, se utiliza el lenguaje de programación R Project, orientado al análisis estadístico en el campo de la ciencia de datos. R permite realizar procedimientos estadísticos y gráficos, así como modelos lineales y no lineales. Se caracteriza por ser libre y gratuito.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En seguimiento a las fases descritas en la introducción, se describen las siguientes tareas:

2.1 Formulación de preguntas de investigación

- a.1 ¿En qué consiste el proceso de conversión de pdf a txt realizado por cada una de las bibliotecas?
- a.2 ¿Cuál es el tiempo que toma la extracción de texto de un documento en formato PDF y su copiado/escritura en un archivo en formato txt?
- a.3 ¿Qué elementos dificultan la transformación de la tarea de pdf a txt?

2.2 Definición de variables

En esta etapa se definen las variables de respuesta: el tiempo (milisegundos) y memoria (bytes). La variable independiente o factor es el tipo de biblioteca con dos niveles (PyPDF2 y Pdfplumber); la unidad de estudio está representada por los nueve documentos de texto. En la Tabla 1 se detalla los elementos del diseño experimental.

Tabla 1. Elementos del diseño experimental

Variables de respuesta	Variable independiente	Niveles (Tipo de Biblioteca)	Unidad Experimental
Tiempo (ms)	Tipo de biblioteca	1. PyPDF2	9 documentos
Memoria (bytes)		2. Pdfplumber	

3. EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

La ejecución de los experimentos se llevó a cabo mediante Python. El experimento se realizó en una computadora portátil con las siguientes características: (Memoria RAM de 3 GB. Disco duro de 500 GB. Procesador AMD 1.60 Ghz x64. Windows 8.1 Pro.). Las versiones utilizadas en la ejecución de la tarea de preprocesamiento (extracción de texto del archivo pdf) son Python 3.10, Pdfplumber 0.1.2, PyPDF2 2.10.3.

Cada documento de ley se procesa con las dos bibliotecas, es decir que cada documento es analizado por PyPDF2 y después es analizado por Pdfplumber. Al ejecutar los experimentos se obtuvieron los siguientes resultados:

El tiempo utilizado por cada biblioteca corresponde al total de milisegundos ejecutada una sola vez. *Timeit.default_timer()* es un módulo que proporciona una forma sencilla de cronometrar el tiempo para pequeños fragmentos de código (Python, 2022).

La memoria del proceso corresponde a la memoria virtual consumida, a partir de la capacidad total de 2.94 GB. Para esta medición se utilizó *psutil* (*python system and process utilities*) que es una biblioteca multiplataforma para recuperar información sobre los procesos en ejecución y la utilización del sistema (CPU, memoria, discos, red, sensores) en Python.

Esta biblioteca es útil principalmente para la monitorización del sistema y la gestión de procesos en ejecución. Su sintaxis es *psutil.virtual_memory()* y devuelve estadísticas sobre el uso de memoria del sistema como una tupla con nombre que incluye las siguientes métricas, expresadas en bytes.

Total: La memoria física total (swap exclusivo).

Disponible: La memoria que se puede dar instantáneamente a los procesos sin que el sistema entre en swap. Esta se calcula sumando diferentes valores de memoria en función de la plataforma y se supone que sirve para monitorizar el uso real de la memoria de forma multiplataforma (Psutil, 2022).

A continuación, respondemos las preguntas de investigación de la sección 2.1.

a.1 ¿En qué consiste el proceso de conversión de pdf a txt realizado por cada una de las bibliotecas?

La tarea consiste en convertir los documentos que se encuentran en formato pdf a formato de texto plano (txt). Se dispone de 9 documentos de ley, los cuáles son leyes ambientales mexicanas de ámbito federal.

Para la biblioteca PyPDF2 el código es el siguiente:

```
#Se selecciona la biblioteca
from PyPDF2 import PdfFileReader, PdfFileWriter
#Se importa la función para medir el tiempo
import timeit
#Se importa la función para medir la memoria
```

```
import psutil
#Se inicia el tiempo total
start = timeit.default_timer()
#Se inicia el tiempo del proceso
start1 = timeit.default_timer()
#Se selecciona el documento a transformar
file_path = '.\Ley de Aguas Nacionales.pdf'
#Función para leer el documento de pdf
pdf = PdfFileReader(file_path)

#Se indica el nombre del archivo en txt que se quiere generar
with open('Ley de Aguas Nacionales.txt', 'w') as f:
#Función para el número de páginas de pdf
    for page_num in range(pdf.numPages):
#Imprimir el número de páginas
        # print('Page: {0}'.format(page_num))
#La función anterior obtienen el número de páginas del pdf
        pageObj = pdf.getPage(page_num)

    try:
#Se convierten esas páginas a txt
        txt = pageObj.extractText()
        print("\n".center(100, '-'))
    except:
        pass
    else:
        f.write('Page {0}\n'.format(page_num+1))
        f.write("\n".center(100, '-'))
#Finaliza el proceso
        f.write(txt)
    f.close()
#Finaliza el tiempo del proceso
end1 = timeit.default_timer()
```

Para la biblioteca pdfplumber el código es el siguiente:

```
#Se selecciona la biblioteca
import pdfplumber
#Se importa la función para medir el tiempo
import timeit
#Se importa la función para medir la memoria
import psutil
```

```
#Se inicia el tiempo total
start = timeit.default_timer()
#Se inicia el tiempo del proceso
start1 = timeit.default_timer()
#Se selecciona el documento a transformar
file_path = 'Ley de Aguas Nacionales.pdf'
#Función para leer el documento de pdf
pdf = pdfplumber.open(file_path)
```

```
#Se indica el nombre del archivo en txt que se quiere generar
with open('Ley de Aguas Nacionales.txt', 'w') as f:
```

```
#Función para el número de páginas de pdf
for page_num in pdf.pages:
    #Imprimir el número de páginas
    # print('Page: {0}'.format(page_num))
#La función anterior obtienen el número de páginas del pdf
#pageObj = pdf.pages[0]

try:
#Se convierten esas páginas a txt
    txt = page_num.extract_text()
    print(".center(100, '-')")
except:
    pass
else:
    f.write(".center(100, '-')")
#Finaliza el proceso
f.write(txt)
f.close()
#Finaliza el tiempo del proceso
end1 = timeit.default_timer()
```

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó la prueba de rangos con Wilcoxon para determinar diferencias entre las bibliotecas PyPDF2 y Pdfplumber con respecto al tiempo utilizado en cada biblioteca y la memoria consumida, además se reportan las medianas con el rango intercuartílico (RIC). Se consideró un nivel de significancia de 0.05. Los datos se representaron mediante gráficos de cajas y alambres. Asimismo, se obtuvieron gráficos de dispersión y el coeficiente de correlación de Spearman para analizar la relación entre el número de páginas con el tiempo y memoria. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software R Project versión 4.2.2.

El diagrama de cajas y alambres es una herramienta grafica que se utiliza para representar una serie de datos numéricos a través de sus cuartiles. De esta manera, se muestran a simple vista la mediana y los cuartiles de los datos, y también pueden representarse sus valores atípicos (Jmp, 2022).

Los diagramas de dispersión usan una colección de puntos colocados usando coordenadas cartesianas para mostrar valores de dos variables. Al mostrar una variable en cada eje, se puede detectar si existe una relación o correlación entre las dos variables. Se pueden interpretar varios tipos de correlación a través de los patrones mostrados en los diagramas de dispersión.

Éstos son: positivo (los valores aumentan juntos), negativo (un valor disminuye a medida que el otro aumenta), nulo (sin correlación), lineal, exponencial y en forma de U. La fuerza de la correlación puede determinarse por la proximidad de los puntos entre sí en el gráfico. Los puntos que terminan muy

lejos del conjunto general de puntos se conocen como valores atípicos (Catalogue, 2022).

La prueba de hipótesis Wilcoxon se utiliza para comparar dos grupos. Se recomienda utilizar cuando los tamaños de muestras son pequeños, además cuando los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas no se cumplen.

5. RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestra el diseño de la matriz de datos utilizado para el análisis de datos.

Tabla 2. Matriz de datos

Ley	Biblioteca	Tiempo (ms)	Memoria (bytes)	Número de páginas
1	1	28.67193	78	128
2	1	37.67446	89.6	112
3	1	11.1584	65.9	73
4	1	14.13138	63.6	71
5	1	15.80249	65	72
6	1	19.69258	92.9	50
7	1	14.2578	87.9	56
8	1	17.43217	74.7	49
9	1	43.59123	94.3	64
1	2	113.4356	89	128
2	2	147.1396	94.5	112
3	2	44.94758	76.4	73
4	2	57.60759	78.8	71
5	2	53.67049	79	72
6	2	61.83369	94.7	50
7	2	123.8179	93.2	56
8	2	58.25793	91.4	49
9	2	47.17654	84	64

a.2 ¿Cuál es el tiempo que toma la extracción de texto de un documento en formato PDF y su copiado/escritura en un archivo en formato txt?

Se observa que la biblioteca PyPDF2 consume menos tiempo en el preprocesamiento de las 9 leyes y el consumo de memoria es menor en la mayoría de los casos respecto a la biblioteca Pdfplumber.

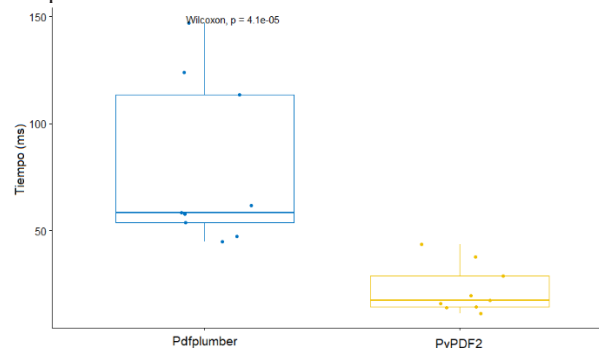


Gráfico 1. Consumo de tiempo para las bibliotecas PyPDF2 y Pdfplumber.

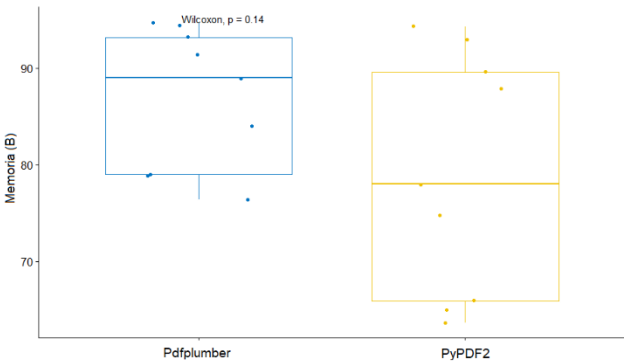


Gráfico 2. Consumo de memoria para las bibliotecas PyPDF2 y Pdfplumber.

En los Gráficos 1 y 2 se puede apreciar que el consumo de tiempo difiere entre las dos bibliotecas (Wilcoxon, $W=45$, $p<0.01$), la biblioteca PyPDF2 consume un menor tiempo de preprocesamiento, se obtiene una mediana de 5.43 (RIC: 18.98) ms, en cambio con la biblioteca Pdfplumber el valor de la mediana es mayor 58.26 (RIC: 68.2) ms. Esto se debe a que la biblioteca Pdfplumber presenta una mayor calidad en la transformación de pdf a txt y esto incide en un mayor tiempo.

Respecto al consumo de memoria no se determinaron diferencias (Wilcoxon: $W=68$, $p=0.14$), con la biblioteca PyPDF2 la mediana es 78 (RIC:25.80) bytes y con la biblioteca Pdfplumber la mediana resultante fue 89 (RIC: 14.95) bytes. La biblioteca 1 (PyPDF2) consume más memoria que la biblioteca 2 (Pdfplumber) ya que preprocesa los datos en todos los documentos de ley con mejores resultados y calidad en los datos al hacer la transformación a txt.

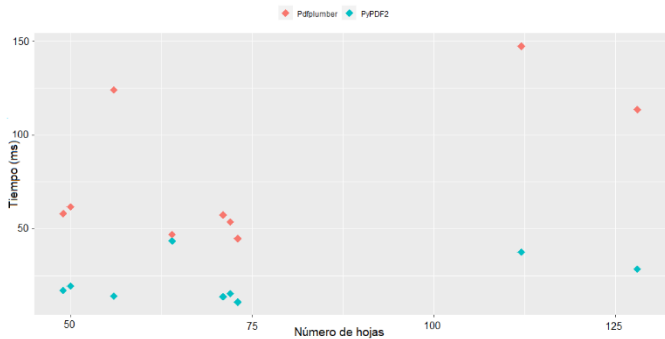


Gráfico 3. Diagrama de dispersión entre el tamaño del documento y el consumo de tiempo en ambas bibliotecas.

En el Gráfico 3 se muestra que no existe relación entre el tamaño del documento y el consumo del tiempo ($r=0.341$). La mayoría de los documentos varían entre 49 y 73 páginas, solo tres documentos contienen más de cien hojas. Con la biblioteca PyPDF2 los tiempos son menor en comparación con la biblioteca Pdfplumber.

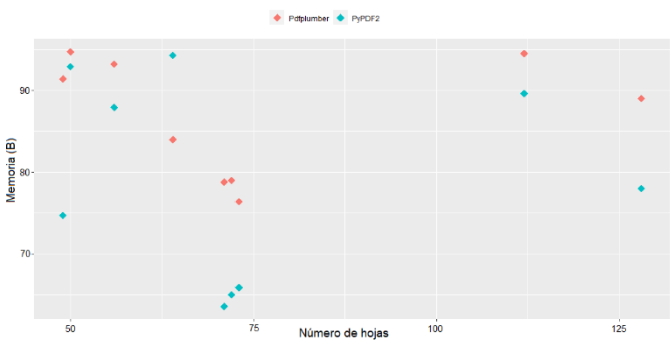


Gráfico 4. Diagrama de dispersión entre el tamaño del documento y el consumo de memoria en ambas bibliotecas.

En el Gráfico 4 se muestra que no existe relación entre el tamaño del documento y el consumo de memoria ($r=-0.007$). En ambas bibliotecas se muestra que sin importar el tamaño del documento el consumo del tiempo varía entre 60 bytes y 95 bytes. En particular la biblioteca Pdfplumber consume mayor memoria.

a.3 ¿Qué elementos dificultan la transformación de la tarea de pdf a txt?

La biblioteca PyPDF2 tiene saltos de página en cada palabra, cuenta guiones, las palabras no están completas, no reconoce signos de puntuación. En cambio, la biblioteca Pdfplumber tiene un mejor conteo en las palabras porque no las corta en guiones. Esta biblioteca sí reconoce: las letras grandes, los pies de página, diferentes signos de puntuación, por ejemplo: puntos, dos puntos, comas, acentos, encabezados (el texto que aparece en la parte superior de cada página), e imágenes.

Tabla 3. Aspectos identificados en las bibliotecas PyPDF2 y Pdfplumber

PyPDF2	Pdfplumber
En el proceso de transformación consume un menor tiempo y memoria.	El proceso de transformación requiere más tiempo y ocupa mayor memoria, sin embargo, obtiene los resultados esperados.
Examina un menor número de palabras y algunas palabras están incompletas.	Examina un mayor número de palabras y la mayoría de las palabras están completas sin cortes en ellas.
Inserta guiones entre las palabras y los espacios entre párrafos.	Inserta menos guiones entre las palabras y los espacios entre párrafos.
Contiene saltos de página y pies de página.	Contiene pocos saltos de página y pies de página.
Inserta muchos espacios en blanco.	Inserta pocos espacios en blanco.
No reconoce letras de	Reconoce letras de diferente

diferente tamaño.	tamaño.
No reconoce comas, puntos, signos de puntuación, acentos.	Reconoce comas, puntos, signos de puntuación, acentos.
No reconoce los encabezados.	Reconoce los encabezados y los transforma tal y como se encuentran.
En el texto de una imagen inserta guiones, espacios, etc.	El texto de una imagen se extrae correctamente.

6. CONCLUSIONES

CRISP-DM establece las tareas genéricas y entregables para cada fase, sin embargo, no indica cómo deben realizarse cada una de éstas. El uso de una guía experimental cíclica en la fase de preparación de datos, permite la repetición o adición de tareas especializadas tras el análisis de sus resultados.

La biblioteca PyPDF2 tiene problemas al transformar ciertos caracteres incluidos en el documento, tales como, letras capitales al inicio de una palabra, fechas, saltos de página y de párrafo, guiones, palabras incompletas y signos de puntuación, haciendo que el conteo de estas sea mayor. En cambio, la biblioteca Pdfplumber hace un mejor conteo de las palabras, sin alterar el texto cuando se encuentran cualquiera de los elementos antes mencionados, incluyendo las imágenes.

Después de la transformación, se hace una comparación del número de palabras entre el documento transformado a txt y el archivo origen pdf, ya que al transformarse el documento de ley se obtienen adicionalmente, sobre todo para la biblioteca PyPDF2, una serie de palabras cortadas y varios espacios vacíos, que alteran el número de palabras encontradas.

Respecto al tiempo consumido por la biblioteca PyPDF2 notamos que la ley LFBOGB obtuvo un 11.1584 ms que fue la que menos tiempo consumió y la ley que mayor tiempo consumió fue LGPGIR obteniendo 43.59153 ms. Por su parte, con la biblioteca Pdfplumber la ley que menos tiempo obtuvo fue LFBOGB con 44.94758 ms y la ley que más tiempo consumió fue la ley LGVS que obtuvo 123.8179 ms.

Respecto a la memoria consumida por la biblioteca PyPDF2 notamos que la ley que menos memoria consumió fue LDRS obteniendo 63.6 bytes y la ley que más memoria consumió fue LPGIR obteniendo 94.3 bytes. Por su parte, con la biblioteca Pdfplumber la ley que menos memoria consumió fue la ley LFBOGB obteniendo 76.4 bytes y la que más memoria consumió fue la ley LGPAS que obtuvo 94.7 bytes.

Entre los principales hallazgos, los resultados mostraron que no existe relación entre el tamaño del documento y el consumo del tiempo. Además, en ambas bibliotecas se observó que sin importar el tamaño del documento el consumo de la memoria varía entre 60 bytes y 95 bytes. En particular la biblioteca

Pdfplumber consume mayor memoria pero hace mejor preprocesamiento de estos documentos. Por lo tanto esta biblioteca se seguirá utilizando para una segunda tarea, la cual consiste en convertir el formato de txt a formato json.

Finalmente, se continuará con el análisis cualitativo del conjunto de palabras obtenido por cada biblioteca y los resultados obtenidos servirán de base para la verificación de las tareas de preprocesamiento restantes y para la caracterización de una dupla, una tarea y un recurso computacional, en una instancia EC2 en la nube.

REFERENCIAS

- Catalogue, T. D. V. (2022). *Diagrama de Dispersión*. https://datavizcatalogue.com/ES/metodos/diagrama_de_dispersion.html
- Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R., Khabaza, T., Shearer, C., & Wirth, R. (2000). *CRISP-DM 1.0*. Github. (2022). *Pdfplumber*. <https://github.com/jsvine/pdfplumber#python-library>
- Hidalgo, M. (2018). *Ayudando al medio ambiente con inteligencia artificial*. Seminario de Aprendizaje Computacional. Centro de Investigación en Inteligencia Artificial (CIIA). Universidad Veracruzana (UV).
- Jmp. (2022). *Diagrama de caja*. https://www.jmp.com/es_co/statistics-knowledge-portal/exploratory-data-analysis/box-plot.html
- McGeoch, C. (2012). *A Guide to Experimental Algorithmics* (C. U. Press (ed.)).
- Psutil. (2022). *Psutil documentation*. <https://psutil.readthedocs.io/en/latest/>
- PyPDF2. (2022). *PyPDF2*. <https://pypdf2.readthedocs.io/en/3.0.0/>
- Python. (2021). *Python*. 2021. <https://www.python.org/>

Metodología para complementar la evaluación de UX interpretando la carga de trabajo a partir de datos fisiológicos del usuario

Edgar Omar Bañuelos Lozoya*, Gabriel González Serna*,
Nimrod González Franco*, Andrea Magadán Salazar*,
Noé Alejandro Castro Sánchez*, Dante Mújica Vargas* y
Alejandro Reyes Ortiz**

*TecNM CENIDET, Cuernavaca, Morelos; {d06ce046, gabriel.gs,
nimrod.gf, andrea.ms, noe.cs, dante.mv}@cenidet.tecnm.mx

**Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciudad
de México; jaro@azc.uam.mx

Resumen: La evaluación de la experiencia de usuario es de naturaleza subjetiva por lo que se busca apoyarla con la interpretación de los estados cognitivos que presenta el usuario durante su interacción con un producto digital. En este artículo se presenta la estructura inicial de una metodología para complementar la evaluación de experiencia de usuario con base en el reconocimiento de carga de trabajo a partir de datos de electroencefalograma, respuesta galvánica en piel, tasa de latidos y diámetro de pupilas.

Palabras clave: UX, mental state, cognitive state, workload, physiological data

1. INTRODUCCIÓN

La experiencia de usuario, del inglés *user experience* (UX), se refiere a las percepciones y respuestas de un usuario que resultan del uso o uso anticipado de un sistema, producto o servicio (ISO, 2010). La evaluación UX tradicional mantiene una naturaleza subjetiva porque se basa en técnicas que dependen de lo reportado por los usuarios y del análisis del evaluador, influenciados por su percepción, experiencia, entre otros factores (van de Laar *et al.*, 2013; Law y Van Schaik, 2010; Law *et al.*, 2014).

Algunos enfoques complementan estas técnicas infiriendo estados mentales a partir de datos inherentes al usuario (p. ej.: Lasa *et al.*, 2015; Matthews *et al.*, 2020), sin embargo, se han concentrado principalmente en el análisis de estados emocionales del modelo de afecto presentado por Posner *et al.* (2005).

2. NUESTRO ENFOQUE

El objetivo de nuestra investigación es complementar la evaluación UX interpretando la carga de trabajo del usuario a partir de datos de: actividad eléctrica del cerebro (EEG), latidos cardiacos (HR), respuesta galvánica de la piel (GSR), diámetro de pupilas y del cuestionario estandarizado NASA-TLX. La figura 1 muestra un participante en uno de nuestros experimentos para captura de datos.

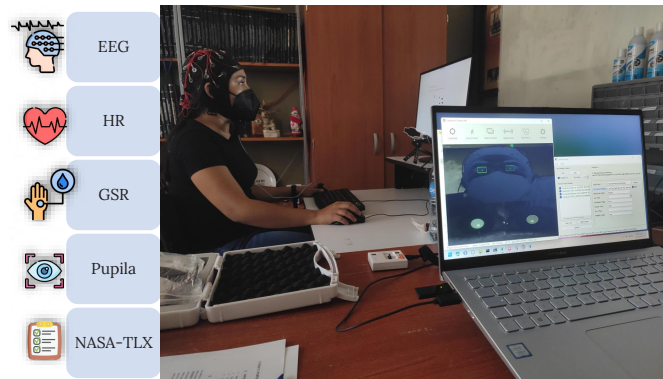


Figura 1. Enfoque complementario para evaluar UX a partir de mediciones fisiológicas.

Algunos aspectos a considerar son los siguientes:

- Se pretende disminuir la subjetividad a partir de datos fisiológicos que son difíciles de contextualizar, interpretar y generalizar.
- La detección de carga de trabajo utilizando modelos de aprendizaje aún no es precisa ni automática.
- Se deben entregar resultados en un tiempo y formato adecuados para que ayuden a los evaluadores a generar recomendaciones significativas.



Figura 2. Metodología propuesta para complementar la evaluación UX.

3. RESULTADOS

Se diseñó una metodología de tres etapas –la estructura general es mostrada en la figura 2– a partir de dos experimentos con 23 y 19 participantes, probando diversos ajustes en los estímulos, datos y modelos de aprendizaje. Incluye las siguientes características:

- Inducción de carga de trabajo con tareas adaptadas de Haapalainen *et al.* (2010), con una barra de tiempo límite y en bloques de diferente dificultad.
- Preprocesamiento de datos EEG con método PREP (Bigdely-Shamlo *et al.*, 2015) y remoción de artefactos oculares a través de análisis ICA.
- Extracción de características estadísticas de las señales fisiológicas y PSD de EEG a partir del método multitaper (Thomson, 1982).
- Selección del modelo con mejor rendimiento: XG-Boost con exactitud de 0.82 en un esquema de validación leave-one-subject-out.

4. CONCLUSIONES

La metodología define un flujo de trabajo para inducir una carga de trabajo polarizada, capturar datos, entrenar un modelo de aprendizaje automático y realizar predicciones en tareas de interacción con un producto digital. La carga de trabajo final de cada segmento se determina por un criterio de mayoría considerando la predicción de al menos cinco participantes.

La metodología se encuentra en proceso de ajuste y evaluación como parte de la última etapa de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Bigdely-Shamlo, N., Mullen, T., Kothe, C., Su, K.M., y Robbins, K.A. (2015). The PREP pipeline: standardized preprocessing for large-scale EEG analysis. *Frontiers in Neuroinformatics*, 9. doi:10.3389/fninf.2015.00016.
- Haapalainen, E., Kim, S., Forlizzi, J.F., y Dey, A.K. (2010). Psycho-Physiological Measures for Assessing Cognitive Load. In *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '10*, 301–310. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/1864349.1864395.
- ISO (2010). ISO 9241-210:2010 Ergonomics of human-system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems. Technical report, International Organization for Standardization.
- Lasa, G., Justel, D., y Retegi, A. (2015). Eyeface: A new multimethod tool to evaluate the perception of conceptual user experiences. *Computers in Human Behavior*, 52, 359–363. doi:10.1016/j.chb.2015.06.015.
- Law, E.L.C., van Schaik, P., y Roto, V. (2014). Attitudes towards user experience (UX) measurement. *International Journal of Human-Computer Studies*, 72(6), 526–541. doi:10.1016/j.ijhcs.2013.09.006.
- Law, E.L. y Van Schaik, P. (2010). Modelling user experience - An agenda for research and practice. *Interacting with Computers*, 22(5), 313–322. doi:10.1016/j.intcom.2010.04.006.
- Matthews, O., Davies, A., Vigo, M., y Harper, S. (2020). Unobtrusive arousal detection on the web using pupillary response. *International Journal of Human-Computer Studies*, 136, 102361. doi:10.1016/j.ijhcs.2019.09.003.
- Posner, J., Russell, J.A., y Peterson, B.S. (2005). The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and Psychopathology*, 17(3), 715–734. doi:10.1017/S0954579405050340.
- Thomson, D.J. (1982). Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proceedings of the IEEE*, 70(9), 1055–1096. doi:10.1109/PROC.1982.12433.
- van de Laar, B., Gürkök, H., Bos, D.P.O., Nijboer, F., y Nijholt, A. (2013). Brain-Computer Interfaces and User Experience Evaluation. In B.Z. Allison, S. Dunne, R. Leeb, J.án@, y A. Nijholt (eds.), *Towards Practical Brain-Computer Interfaces: Bridging the Gap from Research to Real-World Applications*, 223–237. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-29746-5_11.

Reducción De La Fragilidad Del Software Legado Originado Por El Acceso A Datos Compartidos

Miguel Romero Meza*. René Santaolaya Salgado. *
Blanca Dina Valenzuela Robles. * Juan Carlos Rojas Pérez. *

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.
(e-mail: { m21ce026, rene.ss, Blanca.vr, juan.rp } @cenidet.tecnm.mx).

Abstract: La refactorización se ha convertido en una tarea de alta importancia en los procesos de mantenimiento y ampliación del tiempo de vida útil de sistemas existentes de software. La necesidad de refactorizar se debe a la generación de code smell por parte de los desarrolladores debido a las malas prácticas de diseño y codificación, así como por la mejora de calidad de código. Las reglas del paradigma de programación orientado a objetos, contribuyen a la calidad del software, pero no la garantizan. Una propiedad importante de este paradigma es el “encapsulamiento” en la que se promueve la protección del estado de los objetos contra la manipulación externa no autorizada. Para lograr la protección se utilizan las reglas de ocultamiento de datos que cada lenguaje de programación orientado a objetos proporciona. Sin embargo, un descuido frecuente de los desarrolladores es el uso excesivo de los *modificadores* de acceso public o friendly, lo cual origina un incorrecto encapsulamiento. Este es un defecto considerado como code smell porque permite el cambio inadvertido del estado de objetos desde entidades externas, dando origen a la necesidad de su manipulación con objeto de mitigar estos descuidos. Ante este escenario se genera “Fragilidad de Software” como deuda técnica, y el precio a pagar consiste en una reducción del tiempo de vida útil de los sistemas de software en uso. En este trabajo de desarrollo tecnológico se propone un método de refactorización y su automatización para reducir o eliminar la deuda técnica de sistemas de software que es producida por la dimensión de fragilidad, mediante el uso correcto de las reglas de visibilidad para la protección de atributos de objetos de clases de sistemas existentes, desarrollados bajo el paradigma de programación orientada a objetos.

Keywords: refactorización, estado de objetos, code smell, deuda técnica, protección modular, fragilidad de software, encapsulamiento.

1. INTRODUCCIÓN

La protección adecuada de los atributos de clases de programas legados escritos en Java requiere de atención para lograr un correcto encapsulamiento de objetos. Aunque seguir las reglas del paradigma orientado a objetos puede mejorar la calidad del software, el código fuente puede acumular elementos con una estructura deficiente, lo que pone en riesgo el tiempo de vida útil de sistemas de software existentes que se encuentran en uso. La experiencia y habilidades de los desarrolladores de software pueden conducir tanto a buenas prácticas, reflejadas en patrones de diseño útiles para su reuso, así como también a malas prácticas, que pueden producir sistemas técnicamente deficientes, dando lugar a anti-patrones y deuda técnica. Una propiedad importante del paradigma orientado a objetos es el “encapsulamiento” en la que se promueve la protección del estado de los objetos contra la manipulación externa no autorizada. Para lograr la protección se utilizan las reglas de ocultamiento de datos que cada lenguaje orientado a objetos proporciona, sin embargo, un

descuido frecuente de los desarrolladores es el uso excesivo de los modificadores de alcance public y/o friendly. El diseño de sistemas de software carentes de protección genera code smell y origina la necesidad de la manipulación del código fuente con el objetivo de mitigar estos descuidos. Ante este escenario se genera “Fragilidad de Software” como deuda técnica, y el precio a pagar consiste en una reducción del tiempo de vida útil de los sistemas de software en uso. En este contexto, la refactorización se convierte en una herramienta clave para mejorar la calidad del código de sistemas existentes, con mejor diseño, limpios de defectos o factores indeseables, haciéndolos más modulares, fáciles de entender, mínimo retrabajo de mantenimiento y mayor tiempo de vida útil. Este artículo presenta un método de refactorización y su automatización enfocado a la protección modular mediante el ocultamiento de los atributos de objetos de programas o software legado escritos en lenguaje Java. En el desarrollo del método se hace uso de la herramienta ANTLR para el análisis estático del código fuente sujeto a la refactorización. Al final, se presentan los resultados y hallazgos de la investigación, así como las referencias de investigaciones relevantes en el campo.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Code smell

El código desagradable o code smell es el resultado de malas prácticas de los desarrolladores, arquitectos y diseñadores por desconocimiento técnico (Samarthyam, Suryanarayana & Sharma, 2017). Aunque puede variar en su grado, su presencia puede aumentar la intensidad y el costo de mantenimiento. Los cambios continuos al código que son necesarios para limpiar el código de defectos son fuente de fragilidad. Otra fuente son las soluciones a nivel de código que los programadores desarrollan fuera de soluciones ya documentadas como los patrones de diseño (Samarthyam, Suryanarayana & Sharma, 2017) llamados anti-patrones. Otra causa que origina fragilidad es la rigidez o dificultad para cambios del software que hace imposible estimar el costo del cambio. En programas rígidos, la única manera de realizar cambios o incorporar nuevos comportamientos por nuevas capacidades requeridas del sistema es la manipulación del código, lo que origina fragilidad del software. La fragilidad y la rigidez son dos problemas que contribuyen a incrementar la deuda técnica. La fragilidad hace que sea impredecible la cascada de cambios que se propagan en unidades de programa altamente acopladas y el sistema llega a fallar de manera impredecible.

2.2 Protección modular

Una forma de evitar el acoplamiento es utilizando el criterio de protección modular y el principio de ocultamiento de información. La protección modular favorece el encapsulamiento y por tanto su reusabilidad, así como la reducción en los costos de mantenimiento a largo plazo. Cuando se refactoriza un módulo para ganar en protección modular, es necesario el ocultamiento de información tanto de las estructuras de datos como de las funcionalidades que no son puntos de entrada a servicios o interfaces para los clientes y que sólo son utilizadas internamente para complementar aquellos servicios requeridos a través de las funciones que sí son interfaces al cliente.

2.2.1 Encapsulamiento

Suryanarayana, Samartham y Sharma (2015) definen la encapsulación como "una abstracción que sólo expone o filtra detalles de implementación a través de su interfaz pública", lo que ocasiona que sea difícil cambiar la implementación. Cuando los detalles de implementación son declarados públicos se viola el principio de encapsulamiento. Los autores atribuyen esto a que los desarrolladores tienen una falta de conciencia de lo que debería estar oculto, abordando la experiencia de los

programadores y sus conocimientos para poder identificar y separar los aspectos de implementación e interfaz de una abstracción entre sí. Esto permite a los clientes acceder directamente a partes internas de los objetos, lo que puede producir una posible mutación de estados y fragilidad en el software. Para una encapsulación eficaz, es importante separar la interfaz de una abstracción, es decir, el aspecto "qué" de la *abstracción* del aspecto "cómo" de su implementación, (Suryanarayana, Samartham & Sharma, 2015).

2.3 Refactorización

La refactorización es un tema de gran relevancia en el ámbito académico, tanto que se han llevado a cabo diversos estudios al respecto. Algunos de ellos se enfocan en la curva de aprendizaje de los desarrolladores para adquirir habilidades en el uso de herramientas de refactorización (Joao Caldeira, Fernando Brito e Abreu, Jorge Cardoso, Jose Pereira dos Reis 2020). Otros estudios han demostrado que la refactorización es un tema recurrente en los foros de discusión de desarrolladores, en los que se plantean situaciones específicas en las que se requiere ayuda para realizar ciertas estructuras o incluso ciertos lenguajes de programación (Anthony Peruma, Steven Simmons, Eman Abdullah, AlOmar, Christian D. Newman, Mohamed Wiem, Mkaouer, Ali Ouni, 2021). Además, se ha investigado la enseñanza de patrones de refactorización a la inteligencia artificial, con el fin de que esta pueda detectarlos en sistemas de control de versiones y generar nuevo código limpio (Amit Ratheea, Jitender Kumar Chhabrab, R., 2017). En el contexto de nuestro tema de investigación, que se enfoca en la protección de los atributos de objetos en código Java con sus respectivos *modificadores de alcance*, la solución más cercana que se ha encontrado es la técnica de encapsulamiento, que en algunos entornos de desarrollo o IDEs, privatiza los atributos y crea nuevos métodos públicos que, lejos de reducir el acoplamiento, lo incrementan (Microsoft Docs, 2021).

El modificador de acceso apropiado, utilizando las reglas de alcance *public*, *private*, *protected* y *friendly*, soportadas por el lenguaje Java, de cada atributo de clase depende de la permeabilidad deliberada de los desarrolladores. El desconocimiento técnico, habilidad y experiencia de los desarrolladores de lo que constituye una encapsulación eficaz es una de las razones por las cuales los detalles de implementación son declarados "*públicos*" o *friendly*, violando el principio de ocultamiento de información. El objetivo de nuestro desarrollo tecnológico es crear un algoritmo que automatice un método de refactorización de código legado para ocultar el estado de los atributos de objetos de clases a entidades externas, de conformidad con su ámbito de alcance. En este desarrollo se hace uso de ANTLR que es un acrónimo de "ANother Tool for Language Recognition". Es una herramienta de software que se utiliza para generar analizadores sintácticos, también conocidos como *parsers*, para procesar lenguajes formales. ANTLR utiliza una gramática de entrada para generar un analizador sintáctico que puede ser

utilizado en diversos lenguajes de programación. Esta herramienta es ampliamente utilizada en la creación de lenguajes de programación, compiladores, interpretadores, editores de texto y otras aplicaciones relacionadas con el procesamiento de lenguajes formales. (Parr, 2013)

3. EL MÉTODO DE REFACTORIZACIÓN DE PROTECCIÓN DE ATRIBUTOS DE OBJETOS

3.1 Métricas de calidad

En este trabajo se utilizan las métricas propuestas por Nérida Barón en su tesis "Método de refactorización para mejorar la protección modular de arquitecturas orientadas a objetos de sistemas de software existentes" (2020). Estas métricas, diseñadas originalmente para medir la protección modular de los métodos de objetos de clases, se aplicarán en este trabajo con algunas adaptaciones para medir protección modular en los atributos. A continuación, se describen las métricas que se utilizan en este trabajo:

- La métrica PMAP (Protección Modular de Atributos Privados) mide el grado de protección modular de las variables de instancia declaradas con el modificador de alcance *private*. Esta métrica se calcula mediante la detección y suma de las variables *private* de cada clase de objetos y se divide entre el número total de variables, luego se suman todos los valores obtenidos y se divide entre el número total de clases.
- La métrica PMAPr (Protección Modular de Atributos Protegidos) mide el grado de protección modular de las variables declaradas con el modificador de alcance *protected*. Para calcular esta métrica se suman las variables *protected* de cada jerarquía de herencia de clases, entre el número total de variables, luego se suman todos los valores obtenidos y se divide entre el número total de jerarquías de herencia.
- La métrica PMAF (Protección Modular de Atributos Friendly) mide el grado de protección modular de las variables declaradas con el modificador de alcance *friendly* o *"default"*. El valor de esta métrica se obtiene mediante la suma de las variables *friendly* entre el número total de variables.
- La métrica PM (Protección Modular) mide el grado de protección modular de un sistema de software en uso. Para calcular esta métrica, se suman las variables declaradas con un modificador de alcance diferente a *public*, entre el número total de variables.
- La métrica PMT (Protección Modular Total) mide el grado total de protección modular de una arquitectura de clases. Esta métrica se calcula mediante la suma ponderada de atributos *privados*, *protegidos* y *friendly*, y es dividido entre el número total de atributos del proyecto.

3.2 Algoritmo de refactorización de protección de atributos de objetos

En este artículo se presenta un método para la refactorización de atributos de objetos en sistemas existentes escritos en lenguaje de programación Java, utilizando la herramienta ANTLR como metalenguaje para el análisis estático de las estructuras sintácticas y semánticas para este lenguaje. El proceso de refactorización inicia con la selección de los archivos que contienen el código fuente del sistema de software existente en Java que se desea refactorizar. A partir de este código se continúa con la creación de una lista contenedora que contiene los detalles de implementación de cada clase de objetos del programa. La estructura contenedora es creada para mapear todos los datos de las clases a analizar y crear elementos fácilmente manejables para el algoritmo que implementa el método de refactorización.

En el proceso de análisis estático de atributos de clases de objetos, se inicia con la identificación de llamadas en el texto donde se pueden hacer llamadas *public*, luego se avanza a través de los *modificadores* más restrictivos hasta llegar al nivel de atributos con un alcance *private*.

Reglas de verificación y precedencia de *modificadores* de alcance:

Se verifica que el modificador de alcance sea correcto según la posición en que se ubiquen los "métodos-cliente", "atributos accedidos".

1) Se verifica que el acceso de atributos, "métodos-cliente vs atributos-accedidos", ambos ubicados en la misma clase sean calificadas como *private*, siempre y cuando no son invocados por métodos de cualquier otra clase, o por métodos de otras clases del mismo paquete, o por métodos de clases derivadas.

2) Se verifica que el acceso "métodos-cliente vs atributos-accedidos" ubicados en la misma jerarquía de herencia de clases, independientemente del paquete, sean calificadas como *protected*. Aun cuando también sean invocados por métodos de la misma clase, pero que no son invocados por métodos de cualquier otra clase fuera de la jerarquía de herencia, independientemente del paquete.

3) Se verifica que el acceso de atributos "métodos-cliente vs atributos-accedidos", ubicados en diferentes clases pero en el mismo paquete sean calificadas como *friendly*, aun cuando también sean invocados por métodos de clases derivadas e incluso invocados por métodos de la misma clase, y no invocados por métodos de clases de otros paquetes.

4) Se verifica que el acceso de atributos "métodos-cliente vs atributos-accedidos", ubicados en diferentes paquetes sean calificadas como *public*, cuando estos atributos también sean invocados por métodos de otras clases del mismo paquete o invocados por métodos de clases derivadas e incluso invocados por métodos en la misma clase.

Escenarios de cambio de *modificadores* de alcance:

El método de refactorización realiza los cambios de manera apropiada en la estructura contenedora si fuera necesario, conforme a las reglas descritas arriba y las reglas de ocultamiento del paradigma de programación orientado a objetos en lenguaje Java (González, 2021). Si se encuentra un atributo que solo es llamado por un método dentro de la misma clase donde fue declarado, se mueve de manera local dentro del método que lo accede.

Si se encuentra una llamada a un atributo con el modificador incorrecto, se realiza un reemplazo a su modificador conservando el tipo, el valor y alguna otra palabra reservada como *static* y *final*.

La generación de código refactorizado se realiza mediante la librería de ANTLR llamada "String template" StringTemplate. (Parr, 2013). Esta librería es un motor de plantillas que se utiliza para generar código fuente en lenguajes de programación como Java y otras salidas de texto con formato. Esta herramienta potencia la funcionalidad del metacompiador en la generación del código.

En resumen, el algoritmo desarrollado utiliza herramientas y técnicas para analizar y modificar el código fuente de manera eficiente y efectiva. (Parr, 2019).

4 RESULTADOS

4.1 Objetos de prueba

En el siguiente bloque se procede a describir los objetos de prueba usados en la investigación, así como los resultados obtenidos, evaluados mediante las métricas antes y después de ser refactorizados.

Caso de prueba 1: Proyecto PSP3

Tabla 1. Comparativa de cálculo de atributos del proyecto PSP3 antes y después de la refactorización

Atributos	Antes	Después
Totales	63	63
Privados	0	37
Protegidos	0	0
Friendly	51	16
Public	12	10

El proyecto PSP3 contiene ocho clases y un total de 63 atributos. La Tabla 1 muestra la comparativa de cálculo de atributos, (antes y después) de la refactorización. El total de atributos en ambos momentos es de 63. Antes de la refactorización, no se tienen atributos privados ni protegidos, mientras que después de la refactorización se tienen 37 atributos privados y ninguno protegido. Los atributos friendly, disminuyen de 51 a 16 en el segundo momento. Finalmente, en cuanto a los atributos públicos, se tiene una disminución de dos, pasando de 12 a 10.

Caso de prueba 2: Proyecto SUDOKU

Tabla 2. Comparativa de cálculo de atributos del proyecto SUDOKU antes y después de la refactorización

Atributos	Antes	Después
Totales	70	62
Privados	44	44
Protegidos	6	4
Friendly	0	0
Public	20	14

El proyecto SUDOKU contiene 28 clases y un total de 70 atributos. La Tabla 2 muestra, la comparativa sobre la cantidad de atributos antes y después del proceso. Se observa que el número total de atributos disminuyó de 70 a 62 después de la refactorización, esto debido a que ocho atributos fueron reubicados dentro de métodos. Además, que la cantidad de atributos privados se mantuvo en 44. Por otro lado, se redujo la cantidad de atributos protegidos de 6 a 4, mientras que no se registró ningún atributo friendly en ambos casos. Además, se disminuyó la cantidad de atributos públicos de 20 a 14. En general, la tabla indica que se realizaron cambios en los atributos de la implementación del código durante el proceso de refactorización.

Caso de prueba 3: Proyecto SUSHI

Tabla 3. Comparativa de cálculo de atributos del proyecto SUSHI antes y después de la refactorización

Atributos	Antes	Después
Totales	75	74
Privados	7	32
Protegidos	1	14
Friendly	30	5
Public	37	23

El proyecto SUSHI contiene 67 clases y un total de 75 atributos. La Tabla 3 muestra el resultado del cálculo de atributos antes y después de la refactorización. El total de atributos en ambas mediciones fue cercano, con 75 atributos antes y 74 después, un solo atributo fue reubicado dentro de un método. Se puede observar que el número de atributos privados aumentó significativamente de 7 a 32, mientras que el número de atributos públicos disminuyó de 37 a 23. En cuanto a los atributos protegidos, se redujeron de 1 a 14, lo que indica una mayor protección en el código. Además, el número de atributos amigables (friendly) disminuyó drásticamente de 30 a 5, lo que podría indicar que se eliminaron algunos métodos que no estaban siendo utilizados o no eran necesarios. En resumen, la refactorización tuvo un efecto importante en la accesibilidad y protección de los atributos. La reubicación del atributo no pone en riesgo la ejecución del proyecto.

Caso de prueba 4: Proyecto RESTAURANTE

Tabla 4. Comparativa de cálculo de atributos del proyecto RESTAURANTE antes y después de la refactorización

Atributos	Antes	Después
Totales	83	83
Privados	9	68
Protegidos	0	3
Friendly	74	12
Public	0	0

El proyecto RESTAURANTE contiene 89 clases y un total de 83 atributos. La Tabla 4 muestra los cálculos sobre los atributos del proyecto. El total de atributos se mantuvo igual antes y después de la refactorización con un total de 83. Se observa un aumento significativo en el número de atributos privados de 9 a 68, mientras que el número de atributos protegidos se redujo a sólo 3. También se observa una disminución considerable en el número de atributos *friendly* de 74 a sólo 12. No se registraron atributos públicos antes y después de la refactorización.

4.2 Resultados de pruebas

Caso de prueba 1: Proyecto PSP3

Se realizó un análisis exhaustivo de los atributos del proyecto y se verificó que ninguno de ellos se perdió o se movió de manera local a algún método de las clases. Además, se observó una mejora puesto que cerca del 59% de los atributos cambiaron el modificador de alcance a *private* y no hubo cambios a atributos *protected* debido a la falta de jerarquías en el proyecto.

Se observa una reducción del 31% en los atributos con el modificador *friendly* y una reducción de atributos *public* a solamente 2. La clase Correlacion.java fue una de las más afectadas por los cambios, ya que cerca de 21 atributos tuvieron un cambio en su modificador de alcance.

Posteriormente, como se ilustra en la tabla 5, se realizó una comparación entre las métricas antes y después de la refactorización. Se observó un aumento del 45% en la protección modular, lo que dio lugar a una protección modular total del 65%. A pesar de que el proyecto PSP3 no es de gran magnitud, el cambio en los *modificadores de alcance* se efectuó conforme a las reglas enunciadas en la sección 3.2 según la arquitectura del proyecto.

Tabla 5. Comparativa de las métricas del proyecto PSP3 antes y después de la refactorización

Resultados de métricas PSP3		
	Antes	Después
PMAF	0	0.587301587
PMAPr	0	0
PMAF	0.80952381	0.253968254
PMA	0.80952381	0.841269841
TPM	0.202380952	0.650793651

Caso de prueba 2: Proyecto SUDOKU

En este caso se realizaron pruebas de refactorización para evaluar el impacto de mover atributos de clase a atributos locales en métodos. Se identificaron ocho atributos que solo eran utilizados por un método en particular y por lo tanto estos fueron reubicados como atributos locales al método correspondiente de manera apropiada. En este caso particular, no hubo una reducción en el número de atributos *private*, y la ausencia de jerarquías en el proyecto mantuvo el conteo de atributos *protected* en 0. Sin embargo, se observó una reducción del 33% en los atributos *protected* al ser reubicados como locales a métodos; se contabilizaron 0 atributos *friendly*. Los atributos *public* disminuyeron en un 30% al ser reubicados como locales a métodos.

Después de la refactorización, se observó un aumento del 6% en la protección modular total en la métrica PMT. Este resultado se debe a la reubicación de atributos localmente a métodos, lo que redujo el número total de atributos de clase del proyecto. Esta reducción se vio reflejada en el aumento de la protección modular total y en la métrica de atributos declarados como no públicos. La reducción de atributos protegidos también reflejó el aumento de atributos privados.

Tabla 6. Comparativa de las métricas del proyecto SUDOKU antes y después de la refactorización

Resultados de métricas SUDOKU		
	Antes	Después
PMAF	0.628571429	0.709677419
PMAPr	0.271604938	0.166666667
PMAF	0	0
PMA	0.714285714	0.774193548
TPM	0.692857143	0.758064516

Caso de prueba 3: Proyecto SUSHI

En este caso de prueba, los resultados del conteo indicaron que sólo un atributo fue reubicado como atributo local en algún método de clase, lo que provocó un incremento en los atributos con alcance *private* y *protected* y una reducción en los atributos con alcance *friendly* y *public*.

La tendencia de uso de *modificadores private* se vio limitado al uso de los métodos GET y SET, lo que permitió una mayor protección de los atributos. Sin embargo, gran parte de los atributos del proyecto, en su mayoría abstractos, carecían de modificador o fueron declarados con alcance *public*, lo que disminuye su protección.

Los resultados de las métricas antes y después de la refactorización mostraron un aumento del 39% en protección modular y un 59% en protección modular total. Además, se observó una reducción en la métrica PMA, indicando una disminución en los atributos con alcance *public* y un aumento en la métrica PMAF, lo que indica una mejoría en la protección

de los atributos con este modificador de alcance un poco más restrictivo que el de alcance *public*.

Es importante mencionar que, aunque la métrica PM no contempla el conteo de los atributos con alcance *public*, la reducción en la métrica PMAF y el aumento de la métrica PM indica un aumento generalizado en la protección de los atributos. Asimismo, se observó una exponenciación en la protección de los atributos con alcance *protected* y *private*.

Tabla 7. Comparativa de las métricas del proyecto SUSHI antes y después de la refactorización

Resultados de métricas SUSHI		
	Antes	Después
PMAF	0.108433735	0.819277108
PMAPr	0	0.523364486
PMAF	0.891566265	0.144578313
PMA	1	1
TPM	0.331325301	0.88253012

Caso de prueba 4: Proyecto RESTAURANTE

Los resultados obtenidos del caso de prueba RESTAURANTE indican un incremento significativo en la protección modular total del sistema después de la refactorización. En este caso particular, se observó un aumento del 55% en la métrica TPM, que pasó de un 33% antes de la refactorización a un 88% después de ésta.

Se encontró que el proyecto no contaba con atributos con alcance *public*, y que el 86% de los atributos se encontraban en alcance *private*, con una reducción de atributos con alcance *friendly*. Los resultados del conteo indican que la métrica PMA arrojó un valor de 1, lo que significa que los atributos con alcance *public* se acceden mediante funciones GET y SET, lo que proporciona protección modular mejorada.

Se revisó el diagrama de clases y se observó que la mayoría de los atributos involucrados en las jerarquías del proyecto carecían de *modificadores de alcance* adecuados, lo que resultó en un valor de 0 en la métrica PMAPr. Además, antes de la refactorización, el 89% de los atributos tenían un modificador de alcance *friendly*, lo que sugiere que muchos atributos tenían un inadecuado nivel de protección.

Tabla 8. Comparativa de las métricas del proyecto RESTAURANTE antes y después de la refactorización

Resultados de métricas RESTAURANTE		
	Antes	Después
PMAF	0.093333333	0.432432432
PMAPr	0.008333333	0.45
PMAF	0.4	0.067567568
PMA	0.506666667	0.689189189
TPM	0.203333333	0.591216216

4.3 Datos encontrados

Como resultado de esta investigación, se ha encontrado que:

- El sistema de refactorización desarrollado es efectivo para reducir el acoplamiento indirecto, por el uso de datos públicos compartidos, por la utilización de modificadores de acceso incorrectos en los atributos de clase de objetos escritos en lenguaje de programación Java. Este aumento en la protección de los atributos en módulos de programa se basa en las llamadas o accesos directos a los atributos, es decir, el modificador se corrige de acuerdo a qué entidades de software acceden al atributo.
- Previo a la refactorización se observa un uso indiscriminado de los atributos con modificador de acceso *friendly* y *public*, mientras que los atributos con alcance *private* y *protected* fueron los menos utilizados.
- En casos en que la mayoría de los atributos tienen el modificador de acceso correcto, el sistema de refactorización no realiza grandes cambios en el sistema. Sin embargo, si la mayoría de los atributos tienen el modificador de acceso incorrecto, se observa un aumento significativo en la protección modular.
- La experiencia del desarrollador de software no excluye la posibilidad de cometer errores en la protección modular de los atributos de clase. La técnica de refactorización desarrollada en este trabajo es una herramienta efectiva para mejorar la calidad del código.
- Se pudo observar un pequeño sector de atributos declarados, pero no utilizados en el código, lo cual se conoce como "*código dispensable*". Según la literatura (Alexander, S., 2019), este tipo de código no afecta la arquitectura del software en lo absoluto, por lo que es necesario eliminarlo, ya sea que se trate de elementos pequeños como atributos de clase o métodos simples, o de entidades de software a gran escala, como clases enteras o paquetes completos.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, esta investigación demuestra la importancia del uso correcto de los *modificadores de alcance* en la programación orientada a objetos y cómo su aplicación adecuada puede mejorar la calidad del software y su mantenimiento. La técnica de refactorización desarrollada en este trabajo se comprobó como una técnica eficaz para mejorar el diseño de arquitecturas de software orientadas a objetos utilizando las convenciones de visualización admitidas por el lenguaje de programación Java. La investigación muestra que el uso de esta técnica de refactorización puede aumentar la protección modular de un sistema de software, lo que a su vez ayuda a aplicar el principio de ocultamiento de información de manera adecuada y prevenir la manipulación accidental de los detalles internos de las entidades de software por parte de agentes externos.

Así mismo, los resultados obtenidos en este estudio muestran la efectividad de la técnica de refactorización de *modificadores de alcance* para mejorar la calidad del código en sistemas de software escritos en Java. Además, se han

identificado varias recomendaciones para futuros trabajos en esta área, como la ampliación de la técnica para cubrir otros aspectos del diseño y la arquitectura de software, el desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones de diseño específicos con modificadores de alcance incorrectos, y la realización de pruebas adicionales en diferentes contextos de software. Asimismo, se sugiere explorar la posibilidad de desarrollar una extensión para IDE's que faciliten el uso de la técnica de refactorización desarrollada. También se recomienda investigar otras técnicas de refactorización de código en Java que puedan complementar la técnica de modificadores de alcance y mejorar aún más la calidad del código. Por último, se sugiere realizar estudios adicionales para evaluar la eficacia de la técnica de refactorización en términos de mantenibilidad del código y la percepción de los desarrolladores de software sobre su utilidad y facilidad de uso. En resumen, este estudio ofrece valiosas recomendaciones para futuros trabajos en el área de refactorización de código en Java, con el objetivo de mejorar la calidad y la eficiencia del desarrollo de software.

REFERENCIAS

Girish Suryanarayana, Ganesh Samarthayam & Tushar Sharma. (2015). Refactoring for Software Design Smells. Elsevier.

Joao Caldeira, Fernando Brito e Abreu, Jorge Cardoso, Jose Pereira dos Reis. (2020). Unveiling process insights from refactoring practices. bCISUC, Dpto. de Ingeniería Informática Universidad de Coimbra, Portugal.

Narayan Ramasubbu, Chris F. Kemerer. (2021). Controlling Technical Debt Remediation in Outsourced Enterprise Systems Maintenance: An Empirical Analysis. Journal of Management Information Systems.

T. (2021, 6 agosto). Refactor a field to a property - Visual Studio (Windows). Microsoft Docs. <https://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/ide/reference/encapsulate-field?view=vs-2022>

N. Barón. (2020). Método de refactorización para mejorar la protección modular de arquitecturas orientadas a objetos de sistemas de software existentes. National Technology of Mexico/National Center for Technological Research and Development (CENIDET).

Guilherme Lacerda, Fabio Petrillo, Marcelo Pimenta, Yann Gaël Guéhéneuc. (2020). Code Smells and Refactoring: A Tertiary Systematic Review of Challenges and Observations. University of Vale do Rio dos Sinos Polytechnic School.

Amit Ratheea, Jitender Kumar Chhabrab, R. (2017). On the Documentation of Refactoring Types. Rochester Institute of Technology, Stevens Institute of Technology.

Ganesh Samarthayam, Girish Suryanarayana, Tushar Sharma. (2017). Refactoring for Software Architecture Smells.

Amit Ratheea, Jitender Kumar Chhabrab, R. (2017). On the Documentation of Refactoring Types. Rochester Institute of Technology, Stevens Institute of Technology.

Anthony Peruma, Steven Simmons, Eman Abdullah, AlOmar, Christian D. Newman, Mohamed Wiem, Mkaouer, Ali Ouni. (2021, 23 octubre). How Do I Refactor This? An Empirical Study on Refactoring Trends and Topics in Stack Overflow. www.researchgate.net.

https://www.researchgate.net/publication/355583301_How_Do_I_Refactor_This_An_Empirical_Study_on_Refactoring_Trends_and_Topics_in_Stack_Overflow

Joao Caldeira, Fernando Brito e Abreu, Jorge Cardoso, Jose Pereira dos Reis. (2020). Unveiling process insights from refactoring practices. bCISUC, Dpto. de Ingeniería Informática Universidad de Coimbra, Portugal.

T. (2021, 6 agosto). Refactor a field to a property - Visual Studio (Windows). Microsoft Docs. <https://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/ide/reference/encapsulate-field?view=vs-2022>

Parr, T. (2013). The Definitive ANTLR 4 Reference. The Pragmatic Bookshelf.

González, J. D. M. (2021). Modificadores de Acceso. www.programarya.com. <https://www.programarya.com/Cursos/Java/Modificadores-de-Accesomodificadores>

Sistema DAQ mediante IIoT con algoritmos de Machine Learning para seguimiento de procesos industriales

J.E. Soto-Soto* J.I. Hernández-Vega* J.L Sanchez Cuevas** R. Sanjuan-Galindo* M. A. Ochoa-Villegas*

*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Nuevo León, Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación, C.P 67170, Guadalupe, Nuevo León, México

(emails: jesussoto171996@gmail.com; jose.hv@nuevoleon.tecnm.mx; rene.sg@nuevoleon.tecnm.mx; miguel.ov@nuevoleon.tecnm.mx)

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Saltillo, Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales, C.P 25280, Saltillo, Coahuila, México (jonam.sc@saltillo.tecnm.mx)

Abstract: Se describe el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos (DAQ) basado en el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) que utiliza algoritmos de Machine Learning para el seguimiento de variables críticas en procesos industriales. El sistema recopila datos en tiempo real de sensores distribuidos en el proceso industrial, los transmite a la nube a través de una red de comunicaciones segura y los procesa mediante algoritmos para detectar patrones y anomalías. Los resultados se presentan en una interfaz de usuario intuitiva que permite generar predicciones a los usuarios para tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso industrial. El sistema propuesto ofrece una solución eficaz y escalable para el seguimiento de variables críticas en entornos industriales.

Keywords: Sistema de adquisición de datos; machine learning; internet industrial de las cosas (IIoT); monitoreo de variables; predicciones.

1. ANTECEDENTES/PROBLEMÁTICA

La Industria 4.0 y las tecnologías asociadas como el IIoT, el cómputo en la nube y el big data están teniendo un impacto cada vez mayor en la población actual y en las actividades tradicionales de las industrias (Aguilar, 2021). Aunque algunas de estas tecnologías han existido por años, su integración al sector industrial está siendo más cercana gracias a sus capacidades (Rozo-García, 2020). La Industria 4.0 está transformando los métodos tradicionales en las organizaciones, mejorando la eficiencia operativa y organizacional y redefiniendo el modelo de calidad de los procesos. Los países están realizando esfuerzos para difundir estas tecnologías y sus beneficios con el empleo de los sistemas que recopilan información crítica y la procesan para enviarla a una unidad central que almacena los datos (Corzo et al., 2020)(Walas et. al, 2021). Aguirre et al. (2019) plantean una idea muy clara de cómo determinar el comportamiento de éstas a través de estadística descriptiva con el uso de una red de monitoreo de variables en ambientes controlados. Para tener una representación significativa de los datos y sus comportamientos se utilizan interfaces visuales con sistemas embebidos capaces de procesar mucha información en cuestión de segundos para poder darles un propósito específico (Coello et al., 2020). Como parte de la implementación de la industria 4.0 está la Inteligencia Artificial que para los casos de monitoreo de variables que brinda herramientas fundamentales para detectar fallas en los procesos (Ramírez et al., 2018).

	Características de los trabajos					
	DAQ	Big Data	Análisis	Interfaces	IA	Detección de fallas
Corzo et al. (2020)	X					
Walas et al. (2021)		X				
Aguirre et al. (2019)	X		X			X
Coello et al. (2020)	X			X		
Ramírez et al. (2020)					X	X
Soto et al. (2023)	X	X	X	X	X	X

Tabla 1. Características de los trabajos revisados

La falta de innovación tecnológica en la industria manufacturera y la persistencia de métodos analógicos está generando un rezago tecnológico y limitando la eficiencia de los procesos, es el punto a donde se orienta este trabajo.

2. MOTIVACION/JUSTIFICACION

La creciente cantidad de dispositivos IoT en la industria ha llevado a la necesidad de mejorar los sistemas de adquisición de datos para manejar grandes cantidades de datos en tiempo real. Además, la implementación de algoritmos de machine learning permite una mayor eficiencia y automatización en el proceso de

adquisición de datos, lo que puede mejorarse significativamente la toma de decisiones y la eficiencia en los procesos productivos.

3. OBJETIVOS (GENERAL Y ESPECIFICO)

El objetivo principal es desarrollar un sistema de adquisición de datos, empleando herramientas del Internet Industrial de las cosas a través de un sistema embebido para el monitoreo de variables críticas que puedan ser analizadas e interpretadas por agentes inteligentes con algoritmos de machine learning. Los objetivos específicos incluyen:

- Identificar las variables críticas de medición.
- Diseñar y probar un sistema de adquisición de datos.
- Acondicionar las señales de los sensores e instrumentos para que sea posible monitorearlas.
- Implementar interfaces visuales y redes comunicación para mantener el monitoreo funcionando.
- Identificar y desarrollar el agente y su algoritmo de aprendizaje automático que brinde un análisis de comportamiento de las variables para poder tomar decisiones.
- Integrar cada uno de los componentes al sistema inteligente.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se propone la implementación de un sistema de adquisición de datos basado en un sistema embebido y las herramientas del internet industrial de las cosas para mejorar la eficiencia de los procesos. Este sistema permitiría el monitoreo constante de los procesos y la adquisición de datos en tiempo real, lo que permitiría generar un análisis de los datos obtenidos para generar pronósticos mediante algoritmos de machine learning, estos fueron seleccionados por su alta fiabilidad en trabajos revisados en la literatura. Resaltando así su versatilidad y capacidad para adaptarse a cualquier tipo de proceso industrial. Dicho sistema esta conformado por entradas analógicas que están adaptadas al voltaje necesario para extraer las mediciones de los sensores que se utilizan en el proceso para enviarlas a una base de datos que concentrara toda la información de cada una de las variables y por consiguiente tomarlas para su respectivo análisis con los algoritmos y generación de predicciones de los comportamientos de los procesos.



Fig. 1. Tarjeta diseñada para la adquisición de datos

5. ALCANCES

La implementación de un sistema de adquisición de datos mediante un sistema embebido y las herramientas del internet industrial de las cosas para el monitoreo de los procesos industriales tendría diversos alcances y beneficios para las empresas manufactureras para alcanzar mayor eficiencia en los procesos, reducción de costos, mejoras en la calidad del producto y mejor planificación de mantenimiento preventivo.

6. RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y/O EXPERIMENTALES

Los resultados que se tienen hasta el momento con este sistema fueron a través de scripts desarrollados con lenguaje Python con Jupyter Notebook y Google Colab. La metodología implementada es para el diseño de los sistemas ciber-físicos planteada por Jacob Kornerup que trabaja de manera iterativa, que se compone de la integración de elementos físicos con el software para nuestro caso el DAQ desarrollado y los algoritmos implementados (Korneup, 2006). Se trabaja con los datos recopilados por el DAQ para su análisis a través de los algoritmos de Random Forest, Prophet y Regresión logística con técnicas y métodos que generaran predicciones que ayudan a proveer información adecuada del funcionamiento de diferentes procesos industriales.

1. Análisis de variables críticas de temperatura, CO₂, presión y flujo de aire

Se tomaron mediciones durante una hora de las diferentes variables para pronosticar sus posibles tendencias utilizando el algoritmo de Random Forest que nos ayuda a buscar correlación entre cada una de las variables y si esta genera repercusiones conforme aumentan o disminuyen. Al igual se trabajó con el algoritmo de Prophet que pronostica con series de tiempo la tendencia que tendría la variable que se analiza.

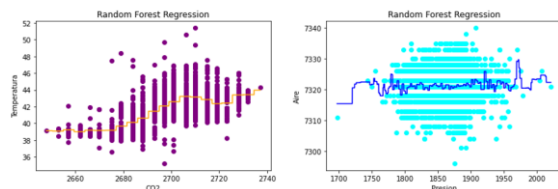


Fig. 2. Análisis con algoritmo de Random Forest

Podemos observar como las variables que se tomaron tienen una correlación bastante cercana, podemos decir que esto demuestra cómo se afecta respectivamente.

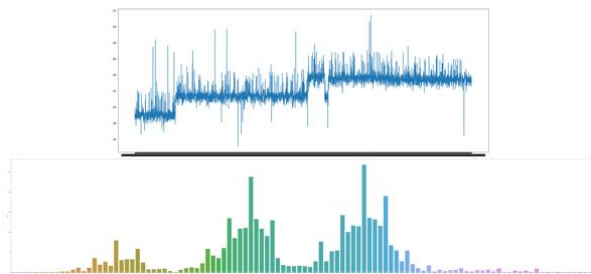


Fig. 3. Datos de Temperatura que fueron analizados con el algoritmo de Prophet

Se puede observar que al analizar los datos que fueron registrados en una hora de Temperatura se muestra una tendencia hacia donde se inclinan las mediciones. Esto los usamos para entrenar el modelo de entrenamiento y generó un pronóstico de la próxima hora.

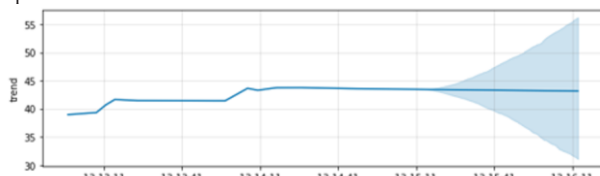


Fig. 4. Pronóstico de Temperatura

2. Análisis de mediciones eléctricas con Random Forest y métricas de precisión y eficiencia del modelo

Se tomaron mediciones de corriente y voltaje en una subestación por 2 días para visualizar como se comportaba el factor de potencia durante ese periodo, con esto

podemos estimar que tanta tendencia entre los horarios de clase se generan los mayores picos. Este pasa por su fase de entrenamiento con los datos que fueron recolectados para generar pronósticos que sean viables para el correcto funcionamiento que rige la norma y no generar cargos en los costos de la electricidad.

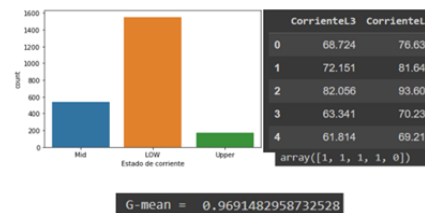


Fig. 5. Modelo de Random Forest con balanceo de hiperparámetros con el set de datos para su predicción y el performance del modelo.

3. Análisis de mediciones en transformadores

Se realizaron mediciones de la corriente para verificar su funcionamiento en base a las tendencias. Se utilizó el algoritmo de Regresión Logística para determinar el estado de los transformadores cuando tienen comportamientos inusuales.

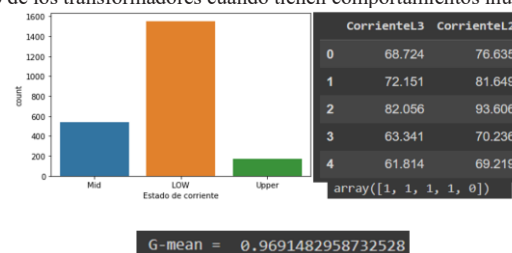


Fig. 6. Distribución de datos conforme al funcionamiento de la corriente, su predicción correspondiente y el performance del modelo.

Podemos destacar que la propuesta de solución, alcances y objetivos que se plantearon están demostrando resultados favorables en las predicciones de las fallas que se generan en los procesos.

7. CONCLUSIONES

En base a los resultados que se han tenido con la variedad de algoritmos trabajados con los diferentes datos que se han recolectado con la tarjeta desarrollada para adquirirlos tuvieron un muy buen desempeño y se ha experimentado con el balanceo de clases que se pueden implementar. El monitoreo de variables puede variar desde un proceso que involucre temperatura, presión, voltaje, corriente entre otros. Los algoritmos de machine learning implementados ayudaron a presentar predicciones para construir modelos más robustos y preparados para sets de datos variados. Esto como contribución a todo aquel proceso que tenga la necesidad de estar bajo control y sin pérdidas. Como trabajos futuros se plantea trabajar con algoritmos de aprendizaje no supervisado para evaluar su rendimiento con los tipos de datos que se están trabajando.

8. REFERENCIAS

- Aguilar, L.J. (2021) Internet de las cosas: Un futuro hiperconectado: 5G, inteligencia artificial, big data, cloud, blockchain, Ciberseguridad. Alpha Editorial.
- Aguirre, E., Barbosa, D., Sanabria, J., Bueno, H., & Vega D. (2019) "Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables agroecológicas en cultivos bajo invernadero," Publicaciones e Investigación, vol. 13, p. 53-60.
- Coello L., Cruz-Segura E. & Santillán, O. (2020) "Sistema de monitoreo y comunicación en tiempo real mediante una interfaz de usuario, para mejorar el proceso de estibación y el registro del producto embotellado en la industria Pascual Tizayuca.," Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca, vol. 5, pp. 1-6.
- Corzo, G. D. & Álvarez-Aros, E. L., (2020). "Estrategias de competitividad tecnológica en la conectividad móvil y las comunicaciones de la industria 4.0 en Latinoamérica" Información tecnológica, vol. 31, pp. 183-192.
- Kornerup, J. (2006) "A vision for overcoming the challenges of building cyber-physical systems".
- Ramírez, J., Sarmiento, H. & López-Lezama, J. (2018) "Diagnostico de fallas en procesos industriales mediante inteligencia artificial," Revista ESPACIOS, vol. 39.
- Rozo-García, F., (2020) "Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0," Revista UIS Ingenierías, vol. 19, no. 2, pp. 177-191, 2020.
- Walas, M. F. y Redchuk, A. (2021) "IIoT/IoT and artificial intelligence/machine learning as a process optimization driver under industry 4.0 model," Computer Science & Technology, Facultad de Informática, Universidad Nacional de la Plata, vol. 21, no. 2.

Revisión de la literatura sobre técnicas de reducción de la dimensionalidad y su aplicación en datos de anticuerpos de SARS-CoV-2

Samuel Narciso, Noemi Chavez-Serret, Yasmín Hernández, Javier Ortiz-Hernández

TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. 62490
México (e-mail: samuelnarciso3280@gmail.com, {m22ce046, yasmin.hp, javier.oh}@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Cada día se generan grandes cantidades de datos que se almacenan con el propósito de obtener conocimiento útil a partir de ellos, utilizando técnicas como la minería de datos, con el propósito de identificar patrones y tendencias en los datos para apoyar en la toma de decisiones. Este proceso incluye, entre otras etapas, la depuración y transformación de los datos. La etapa de transformación de datos es esencial, pues ayuda a preparar los conjuntos de datos para la aplicación de aprendizaje automático, e implica reducir el número de atributos manteniendo una adecuada representación de los datos originales. Se presenta una revisión de la literatura de las técnicas de reducción de la dimensionalidad, junto con una propuesta de técnicas de reducción de dimensiones, para trabajar sobre conjuntos de datos no lineales de anticuerpos de SARS-CoV-2 que contienen gran cantidad de atributos, así como la metodología que será empleada.

Keywords: aprendizaje automático, minería de datos, técnicas de reducción de la dimensionalidad

1. INTRODUCCIÓN

Día a día se generan cúmulos de datos, Brown, (2021) señala que se generan alrededor de 2,000,000 de terabytes de datos al día. El propósito de recopilar y almacenar esta gran cantidad de datos es obtener conocimientos de utilidad a partir de ellos. Sin embargo, se debe mencionar que tener estos volúmenes de datos por sí solos no producen conocimiento, sino que es necesario realizar diversos procesos para extraerlo. Para obtener conocimiento útil a partir de los datos, se requiere realizar un proceso de tratamiento y análisis que incluye, entre otras etapas, la depuración de los conjuntos de datos. Este proceso permite extraer conocimiento relevante que puede ser aprovechable en la toma de decisiones. A este proceso se le conoce como minería de datos, que sirve para identificar patrones y tendencias que puedan apoyar en la toma de decisiones (Witten, 2017).

El procesamiento, la depuración de conjuntos de datos y la obtención de conocimientos útiles son componentes esenciales dentro del proceso de minería de datos. Tal como lo define Kantardžić, (2020), *la minería de datos consiste en la búsqueda de información valiosa, nueva y no trivial en grandes volúmenes de datos*. La minería de datos es una herramienta presente en la actualidad para aprovechar la gran cantidad de información que se genera (Bramer, 2020).

Otro nombre para la minería de datos es KDD que significa *Knowledge Discovery in Databases* (Descubrimiento de Conocimiento en Bases de datos). Es debido mencionar que KDD llama *minería de datos* a la etapa de reconocimiento de patrones. Sin embargo, todas las etapas son propias del proceso de minería de datos, aunque sus nombres varíen. Como se

observa en la Fig. 1 la minería de datos o KDD cuenta con diversas etapas, las cuales van desde la creación, preprocesamiento y transformación de los conjuntos de datos hasta llegar a la interpretación de los patrones descubiertos y la utilización de los conocimientos encontrados (Fayyad et al., 1996).

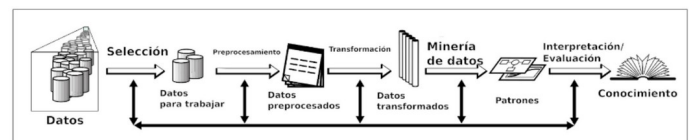


Fig. 1. Etapas de la minería de datos o descubrimiento de conocimiento en bases de datos (Fayyad et al., 1996)

Algunos conjuntos de datos cuentan con muchos atributos, los cuales pueden ser redundantes o innecesarios, además, esto puede dificultar el análisis de los datos y agregar mayor coste computacional a los modelos de aprendizaje generados, es por ello que estos datos se deben transformar, con el propósito de reducir la cantidad de atributos. Es la etapa de transformación de datos la que busca reducir la cantidad de atributos, manteniendo una adecuada representación de los datos originales. Esta tarea se realiza empleando técnicas de reducción de dimensiones, las cuales transforman un conjunto de datos, ya sea eliminando aquellos atributos irrelevantes o redundantes, como haciendo combinaciones de estos entre sí, con el propósito de formar nuevos (Timarán Pereira et al., 2016). El propósito de la etapa de transformación es preparar el conjunto de datos para la aplicación de técnicas de aprendizaje automático. Esto implica generar un conjunto de datos que contenga un menor número de atributos, el cual sea más fácil de manejar y que permita una

mejor interpretación de los patrones descubiertos. Una vez que los datos han sido transformados, se pueden aplicar técnicas de aprendizaje automático para encontrar patrones, tendencias y relaciones significativas en el conjunto de datos. Es decir, el conjunto de datos transformado se utiliza como entrada para estas técnicas, lo que facilita el proceso de análisis y ayuda a obtener resultados más precisos y significativos.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 aborda el concepto de dimensionalidad y se presenta la clasificación de las técnicas de reducción de la dimensionalidad, la sección 3 presenta la revisión de la literatura de técnicas de reducción de la dimensionalidad que han sido empleadas en conjuntos de datos de dominio biológico, la sección 4 presenta la propuesta de diversas técnicas que se pueden emplear para conjuntos de datos de anticuerpos de SARS-CoV-2 con alta dimensionalidad y el trabajo futuro, finalmente la sección 5 presenta las conclusiones.

2. ANTECEDENTES

La dimensionalidad es un concepto esencial en la minería de datos y hace referencia al número de atributos o características que se tienen en un conjunto de datos. En otras palabras, la dimensionalidad se refiere a la cantidad de características que describen cada instancia en un conjunto de datos. Una forma sencilla de entender qué son las dimensiones es comprendiendo las partes que componen un conjunto de datos, los cuales contienen atributos y observaciones. Por ejemplo, si estamos analizando un conjunto de datos que describe diferentes vehículos de ligeros, la dimensionalidad es la cantidad de atributos que se tienen sobre cada vehículo, como el número de ruedas, el color del vehículo, la velocidad máxima alcanzable, etc.

Cuando el número de atributos es alto, puede dificultar el proceso a los algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones relevantes y evitar sobreajuste, lo que se conoce como la maldición de la dimensionalidad. Dicha maldición puede hacer que sea complicado comprender y visualizar los datos, lo que a su vez puede entorpecer la identificación de patrones y relaciones útiles. Además, la alta dimensionalidad puede requerir una mayor capacidad de cómputo y más recursos para procesar y almacenar los datos (Yu & Liu, 2004).

Resulta importante tener en cuenta que no siempre es posible reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos sin perder información útil. Las técnicas de reducción de la dimensionalidad favorecen la comprensión y la eliminación de redundancia del conjunto de datos, de esta forma permite mejorar los diversos procesos de la minería de datos, tales como el proceso de clasificación y visualización de los datos (Arroyo-Hernández, 2016).

La reducción de la dimensionalidad busca seleccionar o crear características para la aplicación de minería de datos, intentando conseguir el máximo rendimiento con el mínimo esfuerzo de procesamiento. El proceso de reducción de características debería dar como resultado menos atributos, mejora en la precisión de la minería de datos, resultados sencillos que sean más fáciles de entender y utilizar, entre otras ventajas (Velliangiri et al., 2019).

Dentro del conjunto de técnicas de reducción de la dimensionalidad existen dos enfoques principales: la extracción de características o *Feature Extraction* y la selección de características o *Feature Selection* (Arroyo-Hernández, 2016).

Las técnicas de extracción de atributos transforman el conjunto de datos inicial y generan un nuevo conjunto de datos a partir de combinaciones de las características originales que retienen la mayor cantidad de información de los datos originales en un menor número de características (Ayesha et al., 2020), mientras que, las técnicas de selección de atributos seleccionan un subconjunto de atributos del conjunto de datos inicial con el objetivo de identificar y seleccionar las características más relevantes del conjunto de datos inicial para mejorar el rendimiento de los modelos de aprendizaje automático. (Zebari et al., 2020).

Existen distintas maneras para clasificar las técnicas de selección de atributos. Una de estas formas es a partir de su relación con los métodos de aprendizaje automático, que se clasifican en modelos de filtro, de envoltura e integrados. Además, según el tipo de resultado que se quiere obtener, los métodos de selección de características pueden dividirse en modelos de rango de características (ponderación) y de selección de subconjuntos (Cai et al., 2018; Zebari et al., 2020).

Resulta importante destacar que, aunque hay técnicas más populares que otras, no existe una que sea adecuada para todos los conjuntos de datos. La selección de la técnica adecuada dependerá de varios factores, como las características del conjunto de datos o la complejidad del problema, entre otras más. También se debe mencionar que el uso de estas técnicas puede ayudar a mejorar el rendimiento de los modelos de aprendizaje automático al reducir la dimensionalidad del conjunto de datos. Sin embargo, una selección inadecuada de la técnica de reducción puede significar la pérdida de tiempo como de recursos, de igual manera que una incorrecta selección de características puede reducir la precisión del modelo y afectar negativamente su capacidad de generalización.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Ali et al. (2017) utilizan el Análisis de Componentes Principales (PCA, del inglés *Principal Component Analysis*) y el Análisis Factorial (FA del inglés *factor analysis*) para reducir la dimensionalidad en datos bioinformáticos de leucemia. Trabajaron con varios conjuntos de datos de leucemia obtenidos del Centro Nacional de Información Biotecnológica, los cuales se dividieron en 4 subconjuntos, cada uno de ellos con 500 atributos, excepto el último que tenía 596 atributos debido al gran tamaño del conjunto de datos. Previo a la aplicación de alguna técnica de reducción de dimensionalidad se determinó la correlación entre los atributos, para posteriormente aplicar PCA, con lo cual se generaron 9 componentes que contenían la mayor varianza de los 500 atributos, a los cuales se agregaron las etiquetas de los datos. Posteriormente, se aplicó el análisis factorial para identificar los atributos más relevantes, facilitando el análisis de los resultados obtenidos. Las técnicas utilizadas permitieron reducir la dimensionalidad de los datos y facilitaron la identificación de atributos significativos del conjunto de datos.

Taveira De Souza et al. (2019) comparan la técnica PCA con varias técnicas de selección de atributos (SA), incluyendo enfoques de filtro y envolvente. Utilizaron siete clasificadores (*naive bayes*, J48, SVM, 1-NN, 3-NN, 5-NN y 7-NN) para evaluar las distintas técnicas. Los resultados fueron evaluados mediante la tasa de aciertos y la desviación estándar de 10 ejecuciones con 10 validaciones cruzadas, utilizando tres bases de datos: *LungCancer-Michigan*, *LungCancer-Ontario* y *LungCancer-Harvard*. Para el análisis de componentes principales, se utilizaron conjuntos de componentes con 90%, 95% y 99% de varianza contenida en sus componentes. Para las técnicas de selección de atributos con enfoque de filtro, se utilizaron las técnicas *correlation-based feature selection* (CFS), *consistency-based subset evaluation* (CSE), *minimum redundancy maximum relevance* (mRMR), *fast correlation-based filter* (FCBF) y una combinación de CSE y mRMR (CSE-mRMR). Para la selección de atributos a partir del enfoque envolvente, se utilizó el método predefinido de *WEKA*. En la tabla 1 se muestra el desempeño de los experimentos.

Tabla 1. Desempeño de las técnicas de selección de atributos y PCA

Conjunto de datos	Mejor técnica SA	Exactitud de la técnica	Mejor conjunto de PCA	Exactitud del conjunto de PCA
<i>LungCancer-Michigan</i>	envolvente	99.70%	90% de varianza	96.57%
<i>LungCancer-Ontario</i>	envolvente	88.33%	90% de varianza	66.19%
<i>LungCancer-Harvard</i>	envolvente	97.62%	90% de varianza	79.42%

El estudio sugiere que para estos conjuntos de datos biomédicos, las técnicas de selección de atributos con enfoque envolvente son más efectivas que PCA.

Becht et al. (2019) comparan las técnicas de reducción de la dimensionalidad *t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding* (t-SNE), Fit-SNE y SCVIS, contra la técnica *uniform manifold approximation projection* (UMAP), utilizando conjuntos de datos etiquetados del dominio biológico, como el *Han_400k Dataset*, *Samsuik Dataset* y *Wong Dataset*. Para evaluar las técnicas se utilizaron algoritmos de agrupamiento, con los cuales se comparó como actuaban estos algoritmos con los conjuntos de datos reducidos. Los autores destacaron la técnica UMAP por proporcionar tiempos de ejecución más rápidos y una mayor reducción de dimensiones en comparación con otras técnicas evaluadas. Además, los resultados de UMAP fueron más rápidos en comparación con t-SNE, mucho más rápidos que SCVIS y comparables a Fit-SNE. Se destacó esta técnica porque ofrece un equilibrio entre exactitud y tiempo de procesamiento, lo que la hace adecuada para el análisis de grandes conjuntos de datos.

Obaid et al. (2019) destacan que la etapa de preprocesamiento de datos es fundamental en el proceso de descubrimiento de conocimiento, por el hecho de que representa más del 50% del esfuerzo total en el análisis de datos, aunque suele ser menos considerada en comparación con otras etapas. Dentro de la etapa de preprocesamiento, la reducción de la dimensionalidad es un proceso clave que implica la transformación de un conjunto de atributos en otro conjunto con menos características. Es por ello que compararon dos métodos de reducción de dimensionalidad. PCA y Análisis Discriminante Lineal (LDA del inglés *Linear Discriminant Analysis*). Mientras que PCA es un método de extracción de características que genera combinaciones lineales de atributos manteniendo la máxima varianza, LDA transforma conjuntos de datos de alta dimensionalidad en conjuntos con menor dimensionalidad manteniendo la información necesaria para la clasificación de los datos. Aunque ambos métodos son eficientes en la reducción de la dimensionalidad, los autores destacan que PCA no funciona bien con tareas de discriminación de datos. La normalización y la discretización de atributos son también procesos importantes en la etapa de preprocesamiento de datos. Las técnicas de normalización incluyen *Decimal Scaling*, *Z-score normalization* y *Min-Max normalization*. La discretización convierte variables continuas en variables discretas mediante la división de variables continuas en un número finito de intervalos que se tratan como categorías. Para evaluar la eficiencia de las técnicas utilizadas en la etapa del preprocesamiento, utilizaron el conjunto de datos *NSL-KDD*, que cuenta con 42 atributos y 25192 instancias. Utilizaron el clasificador J48 para crear modelos de clasificación con los datos preprocesados. En el primer experimento, aplicaron diferentes técnicas de preprocesamiento

por separado en el conjunto de datos, creando un modelo de clasificación con cada uno de ellos. Midieron la exactitud de la clasificación, el tiempo de construcción del modelo y el tiempo de prueba. En el segundo experimento, se compararon las técnicas de reducción de dimensionalidad LDA y PCA. Los investigadores encontraron que PCA con solo 5 componentes obtuvo un 99.28% de exactitud en sus clasificaciones, mientras que LDA utilizando 20 atributos obtuvo un 99.11% de exactitud, lo cual indicó un mayor costo y menor exactitud. Se concluyó que en efecto el preprocesamiento de datos es una etapa fundamental en el proceso de descubrimiento de conocimiento, y aunque todos los métodos de preprocesamiento utilizados dieron resultados positivos, algunos fueron mejores que otros. En particular, PCA demostró ser una técnica de reducción de la dimensionalidad más efectiva que LDA para este conjunto de datos.

Petrusevich, (2020) realiza un estudio para comparar la exactitud de diferentes algoritmos de clasificación en conjuntos de datos que fueron modificados al agregar o reducir dimensiones. El conjunto de datos utilizado fue *Heart Disease Dataset* de enfermedades del corazón, que inicialmente constaba de 13 atributos. Los algoritmos de clasificación utilizados fueron: Árboles de decisión (CART del inglés Classification And Regression Tree), *Random Forest*, *Gradient Boosting*, Máquinas de soporte vectorial (SVM del inglés support vector machine) y regresión logística. En lugar de seguir el enfoque común de reducir dimensiones y posteriormente agregar nuevos atributos, los autores agregaron nuevos atributos al conjunto de datos inicial, específicamente el cuadrado de los atributos enteros del conjunto inicial, creando un conjunto de datos mejorado. Luego aplicaron PCA para reducir la dimensionalidad y crear un conjunto de datos reducido. Se realizaron pruebas para medir la exactitud de los diferentes algoritmos de clasificación utilizando ambos conjuntos de datos. Estos experimentos se realizaron dos veces para observar cómo afecta el aumento de atributos en la exactitud. En el primer experimento, los algoritmos que trabajaron con el conjunto de datos mejorado obtuvieron mejores resultados en términos de exactitud. Para el segundo experimento, el conjunto mejorado tenía un gran tamaño y generaba un costo computacional alto, por lo que optaron por descartar la idea de trabajar con él. En su lugar, se trabajaron con dos versiones reducidas del conjunto de datos, una con 2 componentes que explicaban el 90% de la dispersión de los datos y otra con 4 componentes que explicaban el 99% de la dispersión. En el primer experimento, el conjunto mejorado tenía 44 atributos y el reducido solo 6 componentes. En el segundo experimento, el conjunto mejorado tenía 67 atributos y el reducido únicamente 4 componentes. En el artículo se concluye que agregar atributos puede mejorar un poco la exactitud de algunos métodos de clasificación, pero el aumento excesivo de atributos puede generar un costo computacional alto, lo que hace poco viable trabajar con muchos atributos.

Arowolo et al. (2021) aborda el almacenamiento eficiente de datos bioinformáticos, debido a su complejidad y gran tamaño. Se mencionan tecnologías como *microarrays* y RNA-Seq, que permiten estudiar la expresión de múltiples genes a la vez. Los autores destacan la importancia de la reducción de la dimensionalidad para procesar los grandes conjuntos de datos producidos por estas tecnologías. Las técnicas de reducción de dimensionalidad buscan simplificar los datos para un mejor rendimiento y son esenciales en la investigación de datos de alta dimensión. En particular, las técnicas de selección de atributos han sido útiles en la determinación de los genes relevantes para un tipo específico de cáncer a partir de datos de *microarrays* de expresión génica. Para el RNA-Seq, algunas de las técnicas aplicadas incluyen CFS, *Mutual Information*, PCA, Análisis de componentes independientes (ICA del inglés *Independent component analysis*), *Partial Least Square* y *Kernel-PCA* (K-PCA). Se hace particular énfasis de la importancia de la reducción de la dimensionalidad en el procesamiento de datos bioinformáticos, especialmente en la selección de genes relevantes para el cáncer. Las técnicas de selección de atributos son esenciales en este proceso y se han aplicado con éxito en datos de *microarrays* y RNA-Seq.

Enríquez et al. (2021) realizan una comparación entre los algoritmos de PCA y *CUR Algorithm*, en un conjunto de datos de pruebas de laboratorio relacionadas con el coronavirus realizadas en Ibarra, Ecuador. El conjunto de datos consistió en 256 pruebas, cada una con siete atributos. El objetivo de la investigación fue reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y determinar cuáles variables eran las más relevantes. Luego de aplicar PCA, los investigadores se quedaron con 3 componentes principales que conservaron el 80% de la varianza. Sin embargo, los resultados de PCA no indicaron cuáles variables eran las más importantes. Para solucionar esto, se implementó *CUR Algorithm*, el cual generó una nueva matriz que proporcionó más información sobre cada dimensión. Para ilustrar la importancia de cada atributo, los investigadores generaron un gráfico con los resultados de *CUR Algorithm*, que mostró la relevancia de cada atributo. En este sentido, se destacó que *CUR Algorithm* permitió una mejor interpretación de los resultados, ya que no modificó el conjunto de datos original.

Kim et al. (2021) presentan un enfoque computacional que utiliza la técnica de incrustación de secuencias de proteínas basada en el aprendizaje profundo llamada *ProtVec* para representar un repertorio BCR como un vector de 100 dimensiones. Los autores seleccionaron diversos conjuntos de datos para trabajar, dentro de ellos estaba el repertorio de OAS. Visualizaron cada secuencia CDR3 individual en un gráfico t-SNE. Para ello, extrajeron e incrustaron las diez secuencias más frecuentes en cada repertorio (106 repertorios de pacientes y 106 repertorios sanos) y proyectaron cada secuencia vectorizada en un espacio vectorial bidimensional utilizando

t-SNE. *ProtVec* considera los 3 grupos de aminoácidos como "palabras biológicas" e incrusta cada palabra en un vector de 100 dimensiones. Para visualizar las representaciones embebidas en un espacio vectorial bidimensional, es necesario reducir los datos *ProtVec* de 100 dimensiones a coordenadas x, y. Los autores utilizaron la técnica t-SNE para reducir las dimensiones y fijaron los hiperparámetros específicos en '*perplexity*=30.0' y '*learning_rate*=100' para todos los gráficos t-SNE mostrados en el estudio. Después de embeber cada secuencia de proteína como vectores de 100 dimensiones y reducir sus dimensiones utilizando t-SNE, aplicaron técnicas de agrupamiento para observar los subconjuntos que generaban. Observaron que las familias de proteínas de interés en el artículo se agrupaban con éxito en cinco clases distintas cuando se representaban en espacios vectoriales bidimensionales.

Khalilian et al., (2022) presentan un modelo de aprendizaje profundo para reducción de dimensionalidad, denominado VAEResDR, basado en *autoencoder variacional* (VAE) y red neuronal residual (Resnet). Este *autoencoder* fue comparado con otras técnicas de reducción de dimensionalidad, como PCA, *t-distributed Stochastic Neighbor Embedding* (t-SNE) y *Uniform Manifold Approximation and Projection* (UMAP). Los investigadores llevaron a cabo dos experimentos diferentes. En la primera serie de experimentos, utilizaron las bases de datos Rani, Tras y Yeast, con el objetivo de que el modelo propuesto reconociera las secuencias de CDR-H3 y creara grupos de los nuevos datos con dimensionalidad reducida, esperando obtener cinco grupos utilizando métodos de agrupamiento. En el segundo experimento, utilizaron las mismas bases de datos y añadieron una nueva, OVA, y esperaban generar seis grupos tras la reducción de la dimensionalidad con el *autoencoder* y la aplicación de métodos de agrupamiento. Se evaluó el impacto del modelo VAEResDR en la tarea de reducción de dimensionalidad y agrupación utilizando gráficos de visualización y métricas de calidad de agrupación. Los resultados indicaron que el modelo propuesto redujo la dimensionalidad adecuadamente y permitió que el algoritmo de agrupamiento *K-Means* agrupara correctamente los datos. Concluyeron que el uso de este tipo de modelo de aprendizaje profundo puede ser muy útil para conjuntos de datos de secuencias biológicas.

Rustam et al. (2022) evalúan la eficacia de la técnica *modified Weiszfeld algorithm* (MWA) en la reducción de dimensionalidad de conjuntos de datos de metabolitos y se comparó con varias técnicas de reducción de dimensionalidad, incluyendo PCA, *classical multidimensional scaling* (CMDS), *laplacian eigenmaps* (LE) y *locally linear embedding* (LLE). Para llevar a cabo el estudio, se utilizó un conjunto de datos que recopila información metabolómica de plantas de clavo de cuatro regiones de Indonesia. Se aplicó un preprocesamiento a los datos para tratar los datos anómalos que pueden resultar conflictivos para el algoritmo de agrupamiento, *Fuzzy c means*.

La cantidad adecuada de clústeres fue evaluada utilizando el índice TSS y *Silhouette*. Posteriormente, se redujo la dimensionalidad de los conjuntos de datos antes tratados mediante las técnicas de PCA, CMDS, LE, LLE y MWA. Después de realizar los clústeres y evaluarlos, se encontró que tanto PCA como MWA tenían resultados similares y superiores a CMDS, LE y LLE. Sin embargo, el método *Silhouette index* mostró problemas al identificar la cantidad óptima de clústeres, sugiriendo 11 clústeres, a pesar de que los métodos de *agrupamiento* sugirieron una cantidad menor. Los autores concluyen que tanto PCA como MWA tienen un excelente desempeño en la reducción de dimensionalidad de conjuntos de datos de metabolitos, pero MWA es ligeramente superior y, por lo tanto, recomiendan su uso en conjuntos de datos de metabolómica. La tabla 2 presenta los resultados de la revisión de la literatura.

Tabla 2. Revisión de la literatura

Referencia	Conjunto de datos	Técnicas	Objetivo
Ali et al. (2017)	Conjuntos de datos de leucemia del NCBI	PCA FA	Reducción de la dimensionalidad
Taveira De Souza et al. (2019)	LungCancer-Michigan, LungCancer-Ontario LungCancer-Harvard.	Selección de atributos con enfoque de tipo filtro y envolvente. PCA	Clasificación
Becht et al. (2019)	Han_400k Dataset, Samsuik Dataset, Wong Dataset	t-SNE, Fit-SNE SCVIS UMAP	Agrupamiento
Obaid et al. (2019)	Conjunto de datos NSL-KDD	PCA LDA	Clasificación
Petrusevic h, (2020)	Heart Disease Dataset	PCA	Clasificación
Arowolo et al. (2021)	Conjuntos de datos biológicos	CBFS, Mutual Information, PCA (ICA), Partial Least Square K-PCA	Reducción de la dimensionalidad
Enríquez et al. (2021)	Conjunto de datos de pruebas de coronavirus	PCA CUR-Algorithm	Reducción de la dimensionalidad
Kim et al. (2021)	Conjuntos de datos de anticuerpos	t-SNE	Agrupamiento
Khalilian et al., (2022)	Rani Dataset, Tras Dataset, OVA Dataset, Yeast Dataset	VAEResDR, PCA, t-SNE UMAP	Agrupamiento
Rustam et al. (2022)	Conjunto de datos de información metabolómica	MWA PCA, CMDS, LE LLE.	Agrupamiento

4. REDUCCIÓN DE DIMENSIONES EN CONJUNTOS DE DATOS DE ANTICUERPOS DE SARS-CoV-2

En bioinformática se estudian datos de origen genómico, el análisis de estos datos ayuda a entender diferentes fenómenos biológicos, tales como la generación de anticuerpos. Estos conjuntos de datos contienen una gran cantidad de atributos con una gran variabilidad de posibles valores. Lo cual dificulta su uso en la minería de datos sin antes un preprocesamiento exhaustivo que incluya la reducción de la dimensionalidad.

El proyecto *Observed Antibody Space* (OAS) integra conjuntos de datos de anticuerpos generados por distintas especies para diversas enfermedades. En esta investigación se busca conocer el comportamiento de los anticuerpos de SARS-CoV-2. OAS proporciona conjuntos de datos que contienen información sobre las estructuras de anticuerpos del virus del SARS-CoV-2. Los cuales pueden ayudar a conocer más de los anticuerpos, apoyando la investigación, desarrollo de vacunas y tratamientos, sin embargo, estos conjuntos presentan problemas de dimensionalidad, lo que puede afectar el desempeño de modelos predictivos que los utilicen. Es por ello que se precisa identificar y aplicar técnicas de reducción de la dimensionalidad sobre ellos. Para alcanzar este objetivo se han seleccionado las técnicas de reducción de la dimensionalidad K-PCA y t-SNE, ya que estas técnicas fueron utilizadas en la literatura por otros investigadores para tratar conjuntos de datos de genómica, una característica importante que tienen en común es su capacidad para tratar conjuntos de datos no lineales y no etiquetados. La complejidad del problema radica en seleccionar la técnica adecuada para reducir la dimensionalidad en conjuntos de datos de SARS-CoV-2. Una manera utilizada en la literatura para evaluar las técnicas de reducción de la dimensionalidad en conjuntos de datos es mediante algoritmos de agrupamiento, observando como se comportan estos algoritmos con conjuntos de datos generados por distintas técnicas de reducción de la dimensionalidad. También se precisa del apoyo de expertos en el área, para interpretar correctamente los grupos generados. En la Figura 2 se presenta la metodología para reducir la dimensionalidad.

La metodología propuesta se distingue por estar enfocada en conjuntos de datos que contienen información específica de las cadenas pesadas y ligeras de los anticuerpos de SARS-CoV-2. Estos conjuntos de datos presentan una gran cantidad de atributos cualitativos, siendo estos en su mayoría las cadenas que conforman a los anticuerpos, mientras que en otras metodologías utilizan conjuntos de datos del SARS-CoV-2, pero no se centran en las cadenas de los anticuerpos de este virus, y la mayoría de los atributos de los conjuntos de datos son cuantitativos.

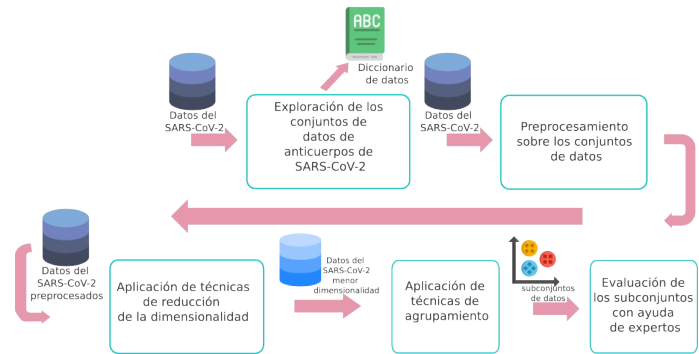


Fig. 2. Metodología propuesta de solución

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La transformación de datos es una etapa de suma importancia, ya que influye en el costo computacional y en el desempeño de los modelos de aprendizaje. Para proporcionar una visión más amplia de las técnicas que han sido empleadas para reducir dimensiones se realizó una revisión de la literatura de diversas investigaciones que trabajaron con conjuntos de datos biológicos, las cuales en su etapa de transformación de datos han utilizado técnicas de reducción de la dimensionalidad. Se ha observado que una de las técnicas más populares para la reducción de dimensiones es PCA, gracias a su eficiencia en la creación de componentes que contiene la mayor varianza de los datos. Sin embargo, su aplicación en conjuntos de datos genómicos conduce a resultados deficientes debido a la naturaleza no lineal de estos conjuntos, con los cuales PCA no trabaja adecuadamente. Para superar esta limitación, se ha desarrollado una variante de PCA llamada K-PCA que se ha aplicado con éxito en conjuntos de datos genómicos no lineales, logrando una mejor reducción de dimensiones en comparación con PCA.

En el futuro, se analizarán y aplicarán técnicas de reducción de la dimensionalidad sobre conjuntos de datos de anticuerpos del SARS-CoV-2 para generar conjuntos con menor dimensionalidad e identificar la técnica adecuada para este conjunto de datos y las características del conjunto que permitieron la transformación. Esto permitirá aportar conocimiento a la etapa de transformación de datos genómicos y apoyar investigaciones futuras.

REFERENCIAS

- Ali, M. U., Ahmed, S., Ferzund, J., Mehmood, A., & Rehman, A. (2017). Using PCA and Factor Analysis for Dimensionality Reduction of Bio-informatics Data. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1707.07189>
- Arowolo, M. O., Adebisi, M. O., Aremu, C., & Adebisi, A. A. (2021). A survey of dimension reduction and classification methods for RNA-Seq data on malaria vector. *Journal of Big Data*, 8(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00441-x>

- Arroyo-Hernández, J. (2016). Métodos de reducción de dimensionalidad: Análisis comparativo de los métodos APC, ACP y ACPK. *Uniciencia*, 30(1). <https://doi.org/10.15359/ru.30-1.7>
- Ayesha, S., Hanif, M. K., & Talib, R. (2020). Overview and comparative study of dimensionality reduction techniques for high dimensional data. *Information Fusion*, 59, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.01.005>
- Becht, E., McInnes, L., Healy, J., Dutertre, C.-A., Kwok, I. W. H., Ng, L. G., Ginhoux, F., & Newell, E. W. (2019). Dimensionality reduction for visualizing single-cell data using UMAP. *Nature Biotechnology*, 37(1), 38–44. <https://doi.org/10.1038/nbt.4314>
- Bramer, M. A. (2020). Principles of data mining (Fourth edition). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7493-6>
- Brown, T. (2021, marzo 21). Who is Using Big Data in Business? [Blog]. Itchronicles. <https://itchronicles.com/big-data/who-is-using-big-data-in-business/>
- Cai, J., Luo, J., Wang, S., & Yang, S. (2018). Feature selection in machine learning: A new perspective. *Neurocomputing*, 300, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.11.077>
- Enríquez, M., Naranjo, S., Amaro, I., & Camacho, F. (2021). Dimensionality Reduction Using PCA and CUR Algorithm for Data on COVID-19 Tests. En M. Botto-Tobar, H. Cruz, & A. Díaz Cadena (Eds.), *Artificial Intelligence, Computer and Software Engineering Advances* (Vol. 1326, pp. 121–134). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68080-0_9
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., & Smyth, P. (1996). The KDD process for extracting useful knowledge from volumes of data. *Communications of the ACM*, 39(11), 27–34. <https://doi.org/10.1145/240455.240464>
- Kantardžić, M. (2020). Data mining: Concepts, models, methods, and algorithms (3rd ed). John Wiley IEEE press.
- Kim, I., Byun, S. Y., Kim, S., Choi, S., Noh, J., Chung, J., & Kim, B. G. (2021). Computational analysis of B cell receptor repertoires in COVID-19 patients using deep embedded representations of protein sequences [Preprint]. *Bioinformatics*. <https://doi.org/10.1101/2021.08.02.454701>
- Obaid, H. S., Dheyab, S. A., & Sabry, S. S. (2019). The Impact of Data Pre-Processing Techniques and Dimensionality Reduction on the Accuracy of Machine Learning. 2019 9th Annual Information Technology, Electromechanical Engineering and Microelectronics Conference (IEMECON), 279–283. <https://doi.org/10.1109/IEMECONX.2019.8877011>
- Petrusevich, D. A. (2020). Features addition and dimensionality reduction in classification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 919(4), 042018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/4/042018>
- Rustam, Gunawan, A. Y., & Kresnowati, M. T. A. P. (2022). Data dimensionality reduction technique for clustering problem of metabolomics data. *Heliyon*, 8(6), e09715. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09715>
- Taveira De Souza, J., Carlos De Francisco, A., & Macedo, D. C. D. (2019). Dimensionality Reduction in Gene Expression Data Sets. *IEEE Access*, 7, 61136–61144. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915519>
- Timarán Pereira, S. R., Hernández Arteaga, I., Caicedo Zambrano, S. J., Hidalgo Troya, A., & Alvarado Pérez, J. C. (2016). Descubrimiento de patrones de desempeño académico con árboles de decisión en las competencias genéricas de la formación profesional. *Universidad Cooperativa de Colombia*. <https://doi.org/10.16925/9789587600490>
- Velliangiri, S., Alagumuthukrishnan, S., & Thankumar joseph, S. I. (2019). A Review of Dimensionality Reduction Techniques for Efficient Computation. *Procedia Computer Science*, 165, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.079>
- Witten, I. H. (2017). Data mining: Practical machine learning tools and techniques (I. H. Witten, Ed.; Fourth Edition). Elsevier.
- Yu, L., & Liu, H. (2004). Efficient Feature Selection Via Analysis of Relevance and Redundancy. *Journal of Machine Learning Research*, 5, 1205–1224.
- Zebari, R., Abdulazeez, A., Zeebaree, D., Zebari, D., & Saeed, J. (2020). A Comprehensive Review of Dimensionality Reduction Techniques for Feature Selection and Feature Extraction. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 1(2), 56–70. <https://doi.org/10.38094/jastt1224>

Modelo basado en redes neuronales artificiales para predecir la tasa de degradación fotocatalítica en aguas residuales.

Katia Rocha-Aguilar * Isidro Hernández-Vega * Cinthia Aba-Guevara * Rene Sanjuan-Galindo * Alejandro Alonzo-García

* Instituto Tecnológico de Nuevo León. División de estudios de posgrado e investigación. Nuevo León, México.

Resumen: Existen diferentes procesos para el tratamiento de las aguas residuales con el fin de reaprovechar y reutilizar el recurso hídrico, por ejemplo, los procesos de oxidación avanzada como la fotocatalisis heterogénea. Sin embargo, hay varios factores que intervienen en la eficiencia de este proceso, por lo que en el cálculo de su eficiencia es necesaria la ejecución de una gran cantidad de experimentos. Como una alternativa avanzada, se presenta el desarrollo de un modelo de inteligencia artificial mediante redes neuronales artificiales (RNA), para predecir la tasa de degradación fotocatalítica, así como la obtención de la eficiencia y la magnitud de la perturbación de las variables en el proceso de fotocatalisis.

Palabras clave: Procesos de tratamiento de agua residual, Redes neuronales artificiales, Inteligencia artificial.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento del consumo del recurso hídrico para las diferentes actividades humanas representa una mayor generación de aguas residuales, por lo que el impacto ambiental no solo se ve reflejado en la sobre-extracción de los mantos acuíferos, sino también en la contaminación de los ecosistemas debido a los contaminantes vertidos en las corrientes naturales (Rodríguez *et al.*, 2018). Existen diferentes procesos que tienen como objetivo llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales para su reaprovechamiento, entre los cuales se encuentran los procesos de oxidación avanzada, como la fotocatalisis heterogénea. Sin embargo, en el proceso intervienen diversos factores que resultan complejos de modelar, predecir y/o controlar. La variación de la composición del afluente, condiciones ambientales, y la tecnología utilizada genera incertidumbre y variaciones que impactan en la calidad y los costos de operación del sistema. Por lo anterior se han aprovechado tecnologías de inteligencia artificial para enfrentar estas complejidades y complicaciones que intervienen en diferentes ámbitos del proceso (Zhao *et al.*, 2020).

1.1 Antecedentes/Problemática

El proceso de degradación de contaminantes mediante fotocatalisis heterogénea representa una opción para eliminar contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales, muchos de los cuales no pueden ser removidos por otros métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. El TiO₂ como fotocatalizador, es uno de los óxidos metálicos más estudiados por su actividad fotocatalítica y sus propiedades (Pelaez *et al.*, 2012). La evaluación de la eficiencia de un proceso de fotodegradación en el tratamiento de aguas es un desafío, ya que el diseño experimental para la optimización del rendimiento del fotocatalizador requiere la inversión de una gran cantidad de tiempo y costo. La actividad fotocatalítica puede verse afectada por diversos factores, como pueden ser el pH del medio, la concentración del contaminante, la longitud de onda e intensidad de la luz, las propiedades del fotocatalizador, etc. Las aplicaciones que se le han dado a la Inteligencia Artificial (IA) en el ámbito de los tratamientos de aguas residuales (TAR) son diversas. En la revisión del estado del arte reportado por Malviya y Jaspal (2021), se reconocen varios tipos de implementaciones con diferentes objetivos. Éstos se pueden clasificar de la siguiente manera: de acuerdo al desempeño de la planta de tratamiento, al modelado de aguas residuales, a la optimización del tratamiento de agua, al control en el tratamiento de agua, y a la optimización energética predictiva. La IA se ha aplicado, por ejemplo, como una alternativa para comprender el patrón no lineal de la remoción de los contaminantes en un proceso, y para predecir el desempeño del tratamiento (Altowayti *et al.*, 2022).

1.2 Motivación/Justificación

Resulta conveniente el uso de la tecnología de inteligencia artificial, como las RNA, para la determinación del porcentaje de degradación fotocatalítica (Jiang *et al.*, 2021), debido a que en el proceso de fotocatalisis existe una variedad de factores que influyen en la eficiencia del proceso, por lo que resulta complejo

de modelar y predecir. Mediante el aprendizaje automático se busca aprovechar la gran cantidad de información reportada sobre el rendimiento del TiO₂ para predecir la tasa de degradación que se presentará en base a los parámetros a los que será expuesto durante el proceso, y los cuales intervienen en el rendimiento de la degradación de un determinado contaminante orgánico. El presente trabajo busca predecir la tasa de degradación fotocatalítica usando fotocatalizador TiO₂, relevante para el análisis de la eficiencia y optimización del proceso.

1.3 Objetivo general

Desarrollar un modelo de predicción de la tasa de degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos por TiO₂ mediante redes neuronales artificiales.

Los objetivos específicos son:

- Seleccionar las variables involucradas en la determinación de la tasa de degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos.
- Seleccionar y almacenar los datos experimentales de entrenamiento que alimentarán el modelo de predicción.
- Analizar y diseñar el modelo.
- Desarrollar el modelo.
- Evaluar la efectividad del modelo.

2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Desarrollo de un modelo de predicción con redes neuronales, para la obtención de la tasa de degradación fotocatalítica del TiO₂ como una alternativa viable y eficiente en comparación con la experimental. Como parte del análisis, se describen las variables utilizadas para entrenar el modelo. Las variables seleccionadas de manera preliminar son listadas en la Tabla 1. Las consideraciones para la selección de los datos de entrenamiento son listados a su vez en la Tabla 2.

Tabla 1. Delimitación de parámetros para el diseño del modelo.

Parámetros del modelo			
Entrada	• Tipo de contaminante (SMILE) • Concentración de contaminante • Dosificación de fotocatalizador • pH inicial • Intensidad de luz UV • Temperatura	Salida	Tasa de degradación

Tabla 2. Consideraciones para la selección de los datos.

Consideraciones para la selección de los datos de alimentación del modelo		
Tipo de reactor	Reactor Batch	Debido a que las variaciones físicas del diseño en comparación con otros son menores debido a su sencillez, evitando el impacto negativo que estas puedan tener en

		el modelo de IA.
Tipo de fotocatalizador	TiO ₂	Debido a su accesibilidad, bajo costo y por ser uno de los más utilizados y estudiados debido a sus propiedades fisicoquímicas.
Medición de la degradación	UV-vis espectrofotómetro	Dispositivo para la medición de la degradación del contaminante objetivo.

De 394 resultados experimentales reportados en 26 artículos de estudio de degradación por fotocatálisis heterogénea, se separan de manera aleatoria el 20% de los datos para el segmento de evaluación por medio del método train_test_split de la librería de scikit-learn. Los parámetros de entrenamiento del modelo se integran por 315 registros (80% del conjunto original), y no se consideran parámetros relacionados a las propiedades físicas y químicas de los reactivos. Mediante las librerías de pandas y statsmodels implementadas con lenguaje python en Google colaboratory, se obtuvieron los resultados de evaluación de los parámetros reportados en la Tabla 3. Se obtuvo la correlación de las variables independientes con respecto a la dependiente (tasa de degradación), encontrando que estas presentaban intensidades nulas. Mediante un algoritmo basado en métodos lineales, las variables solo lograrían explicar 19.5% (R^2) de la variable dependiente, por lo que se concluye que un modelo de predicción lineal no proporcionará los mejores resultados. Se decide utilizar un modelo de RNA que pueda adaptarse al comportamiento no lineal. La prueba de hipótesis F-statistic confirma que existe alguna relación entre las variables independientes y la dependiente, y la significancia estadística permite identificar a las variables con esta relación (aquellas con un valor < 0.05). Se omiten las variables de pH e intensidad de luz en el modelo ya que no cumplieron con el criterio anterior.

Tabla 3. Análisis de correlación y significancia de parámetros.

Parámetros	Correlación	Significancia estadística	R^2
Concentración contaminante	0.315	4.171×10^{-13}	0.195
SMILE	-0.144	2.585×10^{-05}	
Temperatura	-0.187	1.534×10^{-4}	4.38×10^{-16}
Dosificación de catalizador	-0.088	2.632×10^{-3}	
pH	-3.2×10^{-4}	3.611×10^{-01}	
Intensidad luz UV	-0.113	7.445×10^{-01}	

2.1 Alcances

- Construcción del modelo de predicción de la tasa de degradación fotocatalítica por medio de redes neuronales.
- Análisis de resultados.

2.2 Resultados

Después del procesamiento de datos y de la evaluación de diferentes configuraciones de la red neuronal, se presentan en la Tabla 4 los resultados del modelo que obtuvo el menor error en la predicción. Se expone a continuación el análisis para la configuración del modelo.

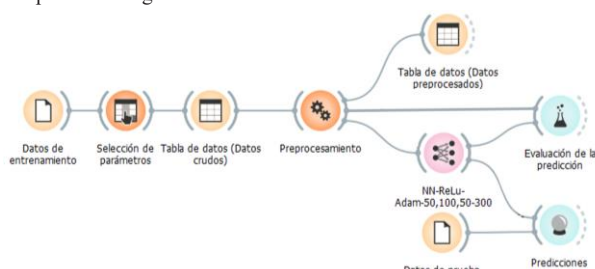


Fig. 1. Desarrollo del modelo.

El desarrollo representado en la Figura 1 se divide en 3 secciones: preprocesamiento, entrenamiento y predicción. Se realizó la comparativa del desempeño variando su configuración en 3 etapas. Previamente al proceso de entrenamiento del modelo, la base de datos se prepara de la siguiente manera:

1. Se seleccionaron las columnas correspondientes a los parámetros que intervienen en el modelo (en base a la evaluación de la Tabla 3).
2. Se depuran las instancias con valores no válidos (valores nulos), así mismo, se normalizan los datos en un rango de 1 a -1.

Etapa 1: Comparativa del desempeño donde se varía la función de activación: Identidad, Tangente hiperbólica, Logística y ReLu. En base a los resultados obtenidos se decide utilizar la función de activación ReLu. Etapa 2: Comparativa del desempeño donde se varía el solver: Adam, LBFGS-B y SGD. En base a los resultados obtenidos se decide utilizar el solver Adam. Etapa 3: Comparativa del desempeño donde se varía el número de neuronas y capas. En base a los resultados obtenidos se decide utilizar la configuración de 3 capas, conformadas de la siguiente manera: 1° capa con 50 neuronas, 2° capa con 100 neuronas y la 3° capa con 50 neuronas.

El análisis para la selección del modelo en base a su desempeño se realizó mediante los resultados obtenidos en la Tabla 4, en comparación con las otras configuraciones entrenadas. El R^2 indica una fiabilidad de predicción del 69.2%, mientras que los valores de MSE (Mean Square Error), RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error) se refieren a métricas relacionadas con el error de predicción. El modelo seleccionado presenta las métricas de error más bajas y el coeficiente de determinación (R^2) más alto.

Tabla 4. Resultados del desempeño del modelo que presentó la mejor predicción.

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
NN-ReLu-Adam-50,100,50	0.524	0.724	0.574	0.692

3. CONCLUSIONES

El análisis para la selección de las variables del modelo permitió obtener una predicción de la tasa de degradación del 69.2% con solo 4 variables (concentración del contaminante, SMILE, temperatura y dosificación del catalizador). La implementación de RNA permitió adaptar el modelo al comportamiento no lineal de las variables con respecto a la variable dependiente. Aunque el pH e intensidad de la luz son variables que experimentalmente sí impactan en la tasa de degradación, debido a que en los datos recabados estas variables no tuvieron mucha variación experimental, poseen una baja relación con la tasa de degradación. Además, existe la posibilidad de que en el caso de la luz UV, habría un rango de intensidad en el que la degradación se realizaría, pero el tiempo en el que se efectuaría sería mayor o menor. La predicción obtenida hasta el momento puede presentar mejoras para disminuir el error de predicción enriqueciendo la base de datos utilizada para el entrenamiento del modelo, y considerando como entrada del modelo parámetros adicionales que intervienen en el proceso de degradación por fotocatálisis. Adicionalmente, el análisis de predicción del desempeño del fotocatalizador puede complementarse considerando la predicción de la mineralización.

REFERENCIAS

- Altowayti, W.A.H. et al. (2022) 'The role of conventional methods and Artificial Intelligence in the wastewater treatment: A Comprehensive Review', Processes, 10(9), pp. 1-31.
- Jiang, Z. et al. (2021) 'A novel machine learning model to predict the photo-degradation performance of different photocatalysts on a variety of water contaminants', Catalysts, 11(9).
- Malviya, A. and Jaspal, D. (2021) 'Artificial intelligence as an upcoming technology in wastewater treatment: a comprehensive review', Environmental Technology Reviews, 10(1), pp. 177-187.
- Pelaez, M. et al. (2012) 'A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications', Applied Catalysis B: Environmental, 125, pp. 331-349.
- Rodriguez, D. et al. (2018) De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.
- Zhao, L. et al. (2020) 'Application of artificial intelligence to wastewater treatment: A bibliometric analysis and systematic review of technology, economy, management, and wastewater reuse', Process Safety and Environmental Protection, 133, pp. 169-182.

Modelado conceptual del proceso de anotación genómica del segmento V

Noemi Chavez-Serret, Samuel Narciso, Javier Ortiz-Hernández, Yasmin Hernández,
Juan Miguel.

Instituto Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, México, CP 62490
(e-mail: {m22ce046, m22ce051, javier.oh, yasmin.hp, d20ce065}@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: El modelado conceptual es el proceso para desarrollar un modelo abstracto o una representación de un sistema, así como el entendimiento de las entidades involucradas y sus relaciones. Este proceso se puede aplicar a diversos dominios, con la finalidad de comprender mejor cómo está construido y el funcionamiento del mundo real para encontrar solución a diversos problemas. En la actualidad, un dominio de enorme interés es el campo de la genómica y la necesidad de atender problemas relacionados con la medicina de precisión, el desarrollo de nuevos medicamentos, el mejoramiento de los cultivos, entre otros. Para desarrollar soluciones basadas en el genoma se requiere adjudicar información biológica para comprender cómo está estructurada y cómo funcionan las secuencias del genoma. Se trata de una actividad compleja realizada por biólogos moleculares a la que se denomina anotación genómica. El proceso de anotación genómica consume actualmente una gran cantidad de tiempo debido a que las anotaciones se realizan de manera manual utilizando como herramienta un visualizador de segmentos del genoma. En vista de hacer más eficiente y sistematizar el proceso de anotación, se decidió modelar el trabajo que realizan los especialistas para clasificar el genoma. En este artículo se presenta un modelo conceptual del proceso de anotación que contiene las reglas que se utilizan para determinar la funcionalidad de los segmentos V y las partes que lo componen como la señal de recombinación y el péptido señal.

Keywords: modelado conceptual, diagrama de actividad, anotación genómica, segmento V, segmentos funcionales

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha incrementado el interés por el uso de modelos conceptuales debido a la necesidad de representar problemas cada vez más complejos en diversos dominios (Guizzardi *et al.*, 2019).

El modelado conceptual permite representar los elementos y relaciones fundamentales de un sistema o de un proceso, logrando una vista general del dominio, más comprensible a un alto nivel de abstracción.

Un modelo conceptual evoluciona en dos etapas de acuerdo a (Birta and Arbez, 2013).

- La etapa inicial “alto nivel” proporciona una perspectiva preliminar para el modelo, sin excesivos detalles.
- La segunda etapa “nivel detallado” profundiza en los aspectos del comportamiento a través de vistas. Es una representación que puede servir de especificación para un programa.

De acuerdo a (David W. Embley and Bernhard Thalheim, 2011) el modelo conceptual debe ser completo y holístico. Debe incluir los aspectos necesarios de los datos (estructura), el comportamiento (función) y la interacción (tanto de los componentes como del usuario).

El modelado conceptual permite representar cualquier dominio con el objetivo principal de facilitar el entendimiento, eliminando la ambigüedad y usando un lenguaje en común entre distintas disciplinas.

Este artículo se estructuró de la siguiente manera: la sección dos se centra en los fundamentos del modelado conceptual y como se ha desarrollado en el transcurso de los años, la sección tres se centra en el modelado conceptual y algunas aplicaciones en el campo de las ciencias genómicas, finalmente en la sección cuatro se desarrolla el modelado conceptual de la anotación y en la sección cinco se presentan conclusiones.

2. FUNDAMENTOS DE MODELADO CONCEPTUAL

En sus orígenes el modelado conceptual se centró principalmente en el campo de las bases de datos. Se desarrollaron dos propuestas: en 1974 el modelo semántico propuesto por Abrial y en 1976 el modelo entidad-relación (ER) propuesto por Chen. Más tarde surgen nuevas aplicaciones del modelado conceptual bajo el concepto de modelado de procesos de negocios, incorporando un nuevo papel en el campo de la ingeniería de software (Robinson *et al.*, 2016).

Posteriormente, en 1995 es desarrollado el Lenguaje Unificado de Modelado (UML, por sus siglas en inglés). UML es un lenguaje gráfico que permite especificar, construir y documentar los artefactos que modelan un sistema. Permite modelar aplicaciones en diversos dominios, tales como telecomunicaciones, comercio, salud, entre otros (Fuentes and Vallecillo, 2004).

Algunos de los modelos más utilizados en modelado conceptual son:

Modelo entidad-relación: permite definir las necesidades de información de una organización. Identificar los asuntos de importancia dentro de una organización (entidades), las propiedades de esos asuntos (atributos) y cómo se relacionan entre sí (relaciones) (Richard Barker, 1990). Es una herramienta para el modelado de datos que facilita la representación de entidades en la construcción de bases de datos.

UML: es un lenguaje estándar utilizado para especificar y documentar sistemas de forma precisa. Dependiendo de los aspectos del sistema que nos interesa observar y describir ofrece diversos diagramas. Algunos de los más utilizados son los siguientes.

- **Diagramas de actividades:** es una representación gráfica que muestra las acciones de los usuarios al utilizar un servicio. Es útil para describir flujos de procesos y tareas de software. Se utiliza para representar actividades ejecutadas por actores diferentes, lo que permite una visión clara y organizada del sistema. Es una herramienta clave en el diseño y análisis de sistemas que mejora la comprensión de flujos de trabajo (Percy Edwin De la Cruz Vélez de Villa, Loayza and Huamán, 2010). Permite asimismo modelar actividades condicionales y paralelas.
- **Diagrama de clases:** describe la estructura de un sistema integrado por objetos que se tiene o se desea tener, así como las propiedades de estos objetos y las conexiones existentes entre ellos. Un diagrama de clases tiene dos elementos básicos, la clase y la relación (Reyes Román and Pastor López, 2018). Son un tipo de diagrama de estructura porque describen lo que debe estar presente en el sistema que se está modelando, de esta forma, puede describir todos los componentes de una clase de una forma sencilla.

Modelo orientado a objetos: son útiles para captar los aspectos de comportamiento de los sistemas. Describe el comportamiento en términos de los ciclos de vida de los objetos (a menudo representados como una máquina de estados) y sus interacciones con otros objetos (Liddle, 2011). Permite la identificación y comunicación de objetos y admite las propiedades de abstracción, herencia y encapsulación de datos.

Modelos conceptuales basados en ontologías (ODCM): tienen como objetivo producir sistemáticamente versiones reducidas de

los modelos conceptuales originales, omitiendo detalles y concentrándose en lo esencial del contenido semántico. Se han empleado para crear modelos conceptuales de entornos académicos, industriales y gubernamentales (Guizzardi *et al.*, 2019).

Modelo BPMN: es un enfoque sistemático para mejorar los procesos empresariales de cualquier organización, está formado por un conjunto de elementos gráficos. Estos elementos permiten desarrollar fácilmente diagramas sencillos que resultan familiares a la mayoría de los analistas empresariales. Tiene cuatro categorías de elementos gráficos para construir diagramas: Objetos de Flujo, Objetos de Conexión, Swimlanes y Artefactos (White, 2004). El modelo BPMN proporciona a los usuarios técnicos la capacidad de representar y aplicar procesos complejos.

Si bien, los modelos conceptuales descritos anteriormente permiten representar dominios complejos, se optó para este trabajo un diagrama de actividades UML debido al detalle que permite representar dentro del dominio genómico respecto al proceso de anotación del segmento V. Sin embargo, no descartamos los anteriores modelos y estaremos explorando la utilidad de algún otro en trabajos futuros.

2.1 Enfoque dentro del modelo conceptual

En los modelos conceptuales existen diversos enfoques que establecen, qué es, cuál es el propósito y cómo se construye un modelo conceptual. (Robinson *et al.*, 2016) propone el siguiente enfoque:

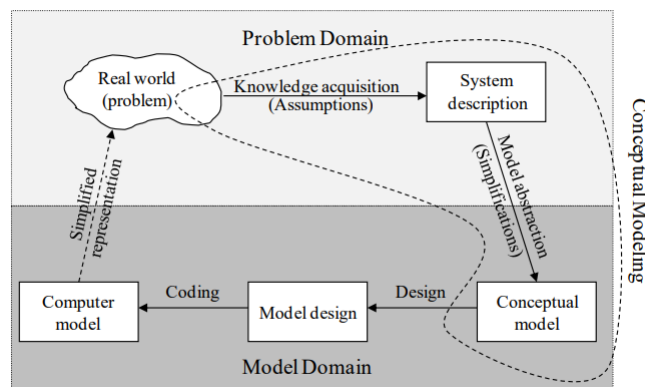


Fig. 1. *Artifacts of conceptual modeling* (Robinson, 2010, 2013, 2014).

En la figura 1 se muestran los artefactos clave del modelado conceptual. La nube representa el mundo real o problemática. Los cuatro rectángulos representan el proceso del modelado conceptual:

- **Descripción del sistema:** describe el problema y los elementos que se relacionan con éste.

- Modelado conceptual: artefactos claves del modelo.
- Diseño del modelado: son los detalles técnicos, contiene datos, componentes, ejecución del modelo, entre otros.
- Modelo informático: representación específica en software del modelo conceptual.

Las flechas muestran el flujo de información que se describe como adquisición de conocimiento, abstracción de modelos, diseño y codificación. Principalmente, destacan las funciones específicas y diferentes de las suposiciones y simplificaciones. Las suposiciones están relacionadas con la adquisición de conocimientos y las simplificaciones están relacionadas con la abstracción del modelo.

Este enfoque es de gran ayuda cuando se plantea realizar un modelo conceptual. Se debe contemplar los artefactos claves que describen el enfoque para tener una mejor visión del dominio que se desea representar. El enfoque se puede utilizar en diversas aplicaciones dentro de campos específicos.

3. APLICACIONES EN EL CAMPO DE LAS CIENCIAS GENÓMICAS

El dominio genómico es una aplicación interesante en dos planos fundamentales: en primer lugar, por las posibilidades que ofrece comprender el lenguaje de la vida y en segundo lugar desde una perspectiva más práctica de aplicación, debido a sus aportaciones en la generación de diagnósticos genómicos (Reyes Román and Pastor López, 2018). En ambos planos es indispensable identificar las ubicaciones de los genes, las regiones codificantes y determinar sus funciones para la construcción de las estructuras biológicas de los seres vivos.

Con el fin de buscar e implementar soluciones en este dominio, el Proyecto del Genoma Humano tuvo como objetivo principal determinar la secuencia completa del genoma del ser humano, para alcanzar una serie de objetivos técnicos y éticos (Escribano, 2008). A partir de este proyecto ha habido un enorme desarrollo del campo de las ciencias genómicas.

El dominio genómico está compuesto por grandes cantidades de datos que no cuentan con una estructura clara y estándar y además se encuentran en constante actualización. Para su comprensión encontramos en (Reyes Román and Pastor López, 2018) antecedentes de la aplicación del modelado conceptual como herramienta para modelar el genoma de cualquier especie. Asimismo, con el objetivo de realizar un tratamiento más eficiente de la información que proporcionaba la biología molecular, se han desarrollado diversas herramientas informáticas (Pastor, López and Giménez, 2012).

Algunos trabajos de Oscar Pastor y sus colaboradores han sido modelos conceptuales de diagramas de clases, enfocados en medicina de precisión, mejoramiento de cultivos, producción de

proteínas, entre otros. Estos modelos han logrado comprender y representar el genoma con el objetivo de crear un sistema de información genómico (GeIS), desarrollando vistas que detallan los componentes básicos del genoma. Los modelos siguen en constante actualización buscando comprender y mejorar el dominio genómico, para ayudar al desarrollo de aplicaciones y a la toma de decisiones en el entorno bioinformático.

Los modelos conceptuales ya desarrollados reportados en la literatura se enfocan principalmente en mostrar los resultados y muy pocos en el proceso que se requiere para llegar al resultado. Además de que se han encontrado muy pocos trabajos que hablen acerca del proceso de anotación del genoma.

En este trabajo se propone un modelo de diagrama de actividades que logra representar la anotación que se realiza de manera manual por parte del Centro de Investigación Sobre Enfermedades Infecciosas (CISEI) del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP). Un grupo de investigadores del INSP han sido los expertos encargados de brindar la información precisa que se requiere para formalizar el modelado conceptual en este trabajo.

3.1 Aplicación de la ingeniería del conocimiento con los expertos

La ingeniería del conocimiento localiza, organiza, transfiere y utiliza la información (Duffy, 2000). Para (Hibbard, 1997) es el proceso de obtener conocimientos colectivos de cualquier dominio y representarlo en bases de datos, papel o cualquier otra herramienta.

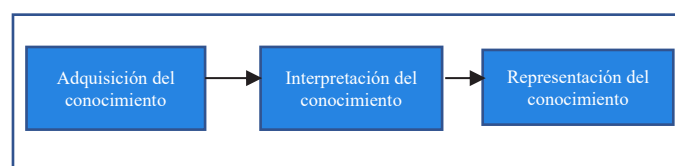


Fig. 2. Proceso de la ingeniería del conocimiento

La ingeniería del conocimiento consta de 3 pasos, como se muestra la figura 2:

1. Adquisición del conocimiento: a través de un determinado método de interacción con los expertos, consiste en la adquisición estructurada de datos y de información relevantes del dominio de interés con relación a una problemática determinada.
2. Interpretación del conocimiento: el conocimiento adquirido es filtrado, transformado en un formato o lenguaje informático y eventualmente es reinterpretado para facilitar su comprensión.

3. Representación del conocimiento: una vez interpretado el conocimiento se busca representarlo de manera concisa, si posible a varios niveles de abstracción utilizando modelos conceptuales en vista de su posible formalización..

La ingeniería del conocimiento fue de apoyo para desarrollar el modelo del proceso de anotación. El primer paso fue la adquisición del conocimiento, en este paso se tuvo constante interacción con los especialistas por medio de reuniones y salas virtuales donde se mostraba cómo ellos realizaban el proceso de anotación con el genoma de una especie. Además, cada cierto tiempo se programaba pláticas referentes a biología molecular, en donde se podía aclarar dudas que se llegaran a presentar.

Posteriormente de haber adquirido la información suficiente se continuó con el paso de interpretación del conocimiento, donde los informáticos comenzaron a interpretar esa información de manera más entendible y concisa para cualquiera que no contara con bases biológicas, también se comenzó a buscar la manera de llevarlo a una representación formal, en este caso computacional.

Como último paso, se representó toda la información brindada por los especialistas, primero se realizaron bosquejos informales de modelos, posteriormente se desarrolló un modelo el cual lograba visualizar todo el proceso de manera muy general, pero no incluía todo lo que se buscaba representar, por último, se desarrolló un modelo conceptual de diagrama de actividades debido al detalle que se podía representar del proceso de anotación del segmento V.

3.2 Proceso de anotación por parte de los especialistas del INSP

La anotación del genoma es el proceso de identificar la información de las secuencias que contienen los segmentos del genoma de una determinada especie.

El genoma consiste en una cadena de nucleótidos que contiene la información de un individuo, se conforma de cuatro letras A, T, C y G. El proceso de deducir el orden de los nucleótidos en el genoma se denomina secuencia (National Human Genome Research Institute, 2019). Un segmento es una secuencia del genoma. Los segmentos se dividen en funcionales aquellos que logran producir un anticuerpo y los no funcionales no completan el proceso.

En este trabajo los investigadores del INSP realizaron el proceso de anotación para clasificar el genoma de un individuo (murciélago) con el objetivo de identificar si contiene segmentos V y su funcionalidad.

El segmento V es una región variable que codifica el genoma humano (H Lents and Ph.D., 2009). El segmento V consiste en tres partes: el péptido señal, la señal de recombinación (RSS) y el exón, cada uno contiene ciertas reglas para determinar si se

trata de un segmento funcional, si alguna parte del segmento V no se presenta o cumple con las reglas, se clasificaría como no funcional. Cada parte consiste en:

- El péptido señal es una secuencia corta de aminoácidos que indica dónde comienza el segmento genómico.
- La señal de recombinación permite la unión entre dos segmentos genómicos.
- El exón es una región del genoma, algunos exones son codificantes, es decir que contienen información para producir un anticuerpo. Para este trabajo aún no se contempla el exón, pero es importante mencionarlo debido al papel que desenvuelve dentro del segmento V.

A continuación, se muestra el proceso de anotación que realizan los especialistas de manera manual. La anotación manual requiere una infraestructura considerable y herramientas específicas, lo que la hace costosa. No obstante, se ha mantenido como un estándar para la anotación funcional. (Iliopoulos *et al.*, 2003).

Los investigadores utilizan el software *Integrative Genomics Viewer* (IGV) es una herramienta interactiva de alto rendimiento para la exploración visual de datos genómicos. Permite visualizar los segmentos y analizar la funcionalidad. (Robinson *et al.*, 2023).

El programa solo proporciona una aproximación, por lo que es necesario que los especialistas, basados en su experiencia y las reglas establecidas por la biología molecular, determinan si el segmento V localizado cumple con todas las características para ser funcional o si se trata de un segmento no funcional (Sirupurapu, Safonova and Pevzner, 2022).

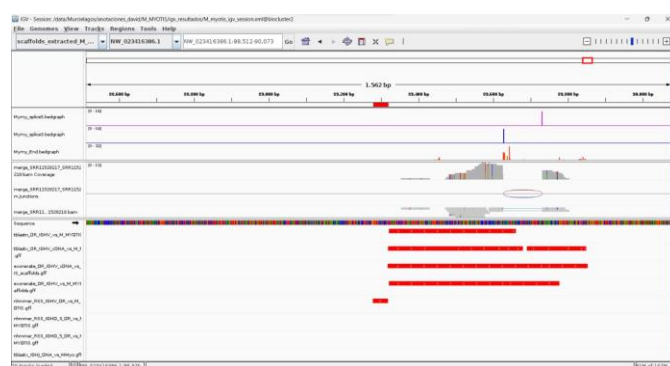


Fig. 3. Visualizador IGV del segmento V

En la figura 3 se muestra como el software IGV donde se visualizan los archivos que contienen el genoma y sus elementos. Una vez obteniendo esto se puede comenzar con la clasificación del segmento V.

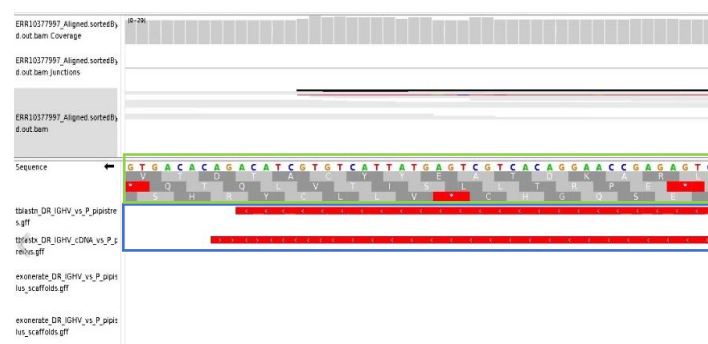


Fig. 4. Visualizador IGV alineamientos y secuencias

En la figura 4 se observa dentro del recuadro azul los elementos (alineamientos) con las que trabajan los especialistas para clasificar el genoma, dentro de los elementos se encuentran las secuencias que son un conjunto de caracteres en nucleótidos y aminoácidos.

Los nucleótidos se componen de cuatro letras A, C, G, T y los aminoácidos se forman por la combinación de tres nucleótidos, un ejemplo es la Glicina que se da por medio de GGT o GGG.

En la figura 4 los nucleótidos se encuentran en la primera fila y las otras tres son marcos de lectura en nivel de aminoácidos. Un marco de lectura es una de las posibles formas en que se puede leer una secuencia de nucleótidos del genoma. La lectura se da por medio de un triplete, pero este podría desplazarse uno o dos lugares, que podría formar una nueva lectura (National Human Genome Research Institute, 2019).

Un ejemplo, se tiene la siguiente secuencia de nucleótidos **AGG****TTGA**-CCC una lectura sería AGG como se muestra en el recuadro rojo, la segunda podría ser GGT que se observa en el recuadro verde y la tercera GTG del recuadro amarillo, cada lectura se traduciría a un diferente aminoácido.

Todo este conocimiento se requiere para realizar el proceso de anotación y su correcta clasificación del segmento V. Una vez obteniendo esta información se puede proceder a desarrollar el modelado conceptual del proceso de anotación del segmento V.

4. MODELADO CONCEPTUAL DE LA ANOTACIÓN

El modelo es un diagrama de actividades que representa el proceso de la anotación de los segmentos V, se desarrolló con ayuda de los expertos del INSP.

El modelo muestra lo siguiente:

1. El proceso de anotación y clasificación del segmento V
2. Las reglas para identificar la Señal de Recombinación
3. Las reglas para identificar el Péptido Señal

1. Proceso de anotación y clasificación del segmento V

El proceso de anotación se representa por medio de un diagrama de actividades, el cual cuenta con cuatro actores como se muestra en la figura 5.

- El primer actor es el Investigador (especialista), es quien realiza las actividades de decisión y clasificación, este interactúa con los siguientes tres actores.
- El segundo actor es el Visualizador IGV este es un software que utilizan los especialistas, donde se muestra los resultados de las herramientas que contienen el segmento V.
- El tercer y cuarto actor son dos programas que ayudan a encontrar las partes del segmento V, Hammer es el encargado de encontrar la señal de recombinación y Blast encuentra el péptido señal.

En la figura 6 se muestra como primer plano la interacción del investigador con el visualizador IGV. Para comenzar con el proceso de anotación, el investigador carga el archivo del ADN de una especie en formato de texto (Fasta) y un segundo formato que muestra las coordenadas de interés del genoma (GFF).

El visualizador muestra el genoma y las partes que lo componen. Una vez que el software lo visualiza, se selecciona un área de interés. El área es un conjunto de elementos mejor conocidos como alineamientos. El especialista selecciona cualquier elemento que se encuentre en el área de interés y el visualizador muestra la longitud del elemento, debe abarcar entre 300 a 500 caracteres (nucleótidos). Si contiene esta característica se puede continuar con la siguiente actividad, si no, se debe buscar otro elemento.

Una vez identificando que el elemento abarque esta longitud, se debe marcar el inicio y el fin en el visualizador para no perder el elemento seleccionado. Posteriormente se analiza la secuencia del elemento seleccionado y el software muestra los caracteres (nucleótidos y aminoácidos) que se encuentran dentro de la secuencia.

A continuación, se requiere utilizar el conocimiento del experto, aplicando las reglas para identificar los componentes del segmentó V que se visualiza a través de Hammer y Blast como lo muestra la figura 7.

Los programas encargados de extraer la información de la señal de recombinación y el péptido señal generan una aproximación que son heurísticas, estas muestran diversos resultados, donde cada uno puede comenzar y finalizar en posiciones diferentes. El investigador procede a identificar la señal de recombinación y péptido señal.

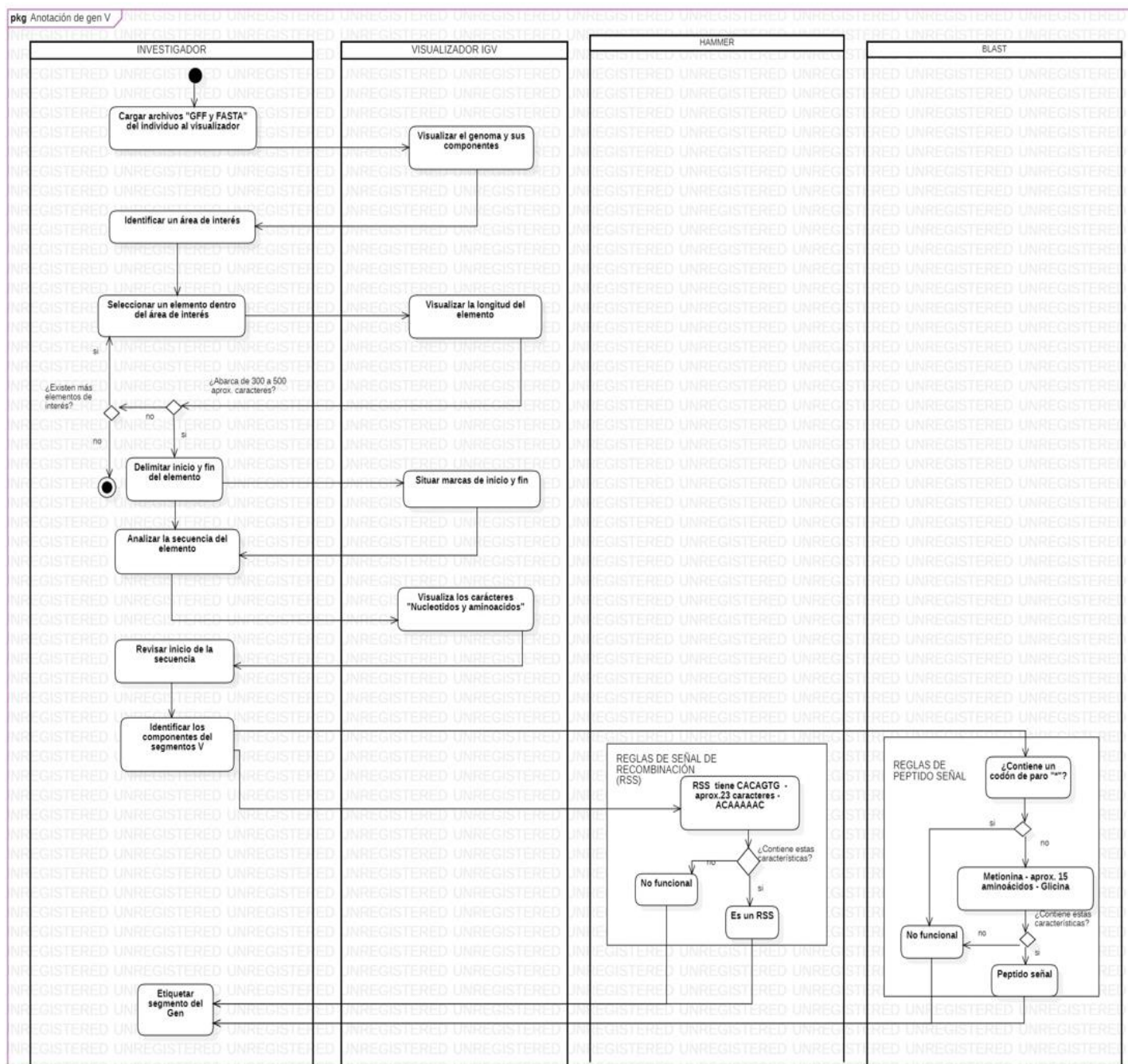


Fig. 5. Modelo conceptual del proceso de anotación del gen V

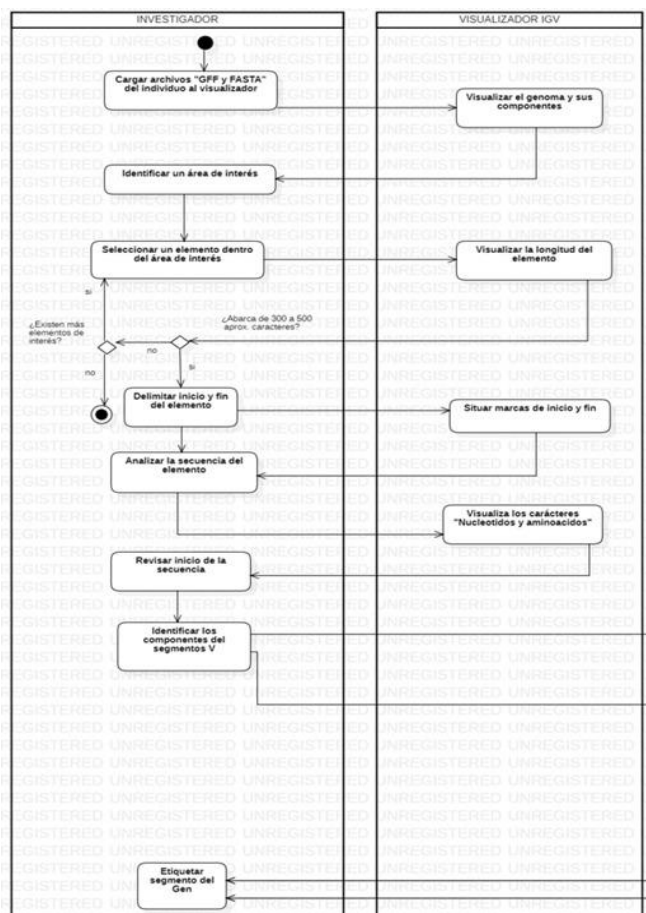


Fig. 6. Modelo conceptual interacción investigador con visualizador

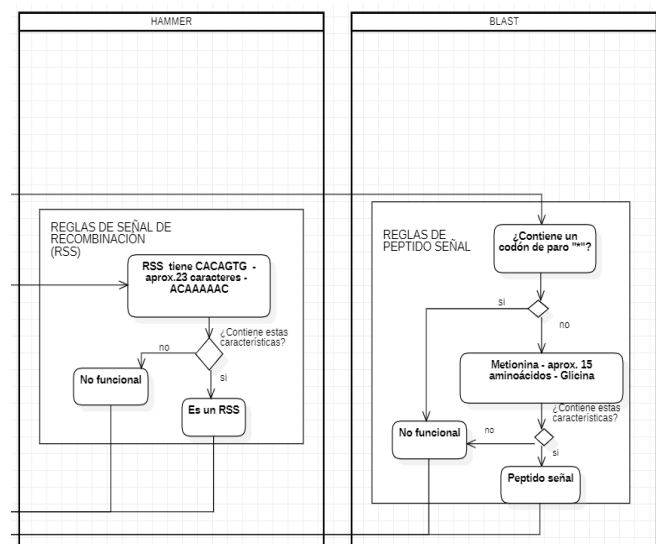


Fig. 7. Modelo conceptual interacción de Hammer y Blast

2. Reglas para identificar la Señal de Recombinación

El programa Hammer es el encargado de encontrar una aproximación para identificar la señal de recombinación. Una vez que se tienen las aproximaciones, el investigador busca, dentro del elemento seleccionado la secuencia en nivel de nucleótidos, las siguientes reglas:

Es fundamental que al inicio de la regla se encuentre los caracteres CAC- las siguientes cuatro letras podrían llegar a variar, normalmente se representa de la siguiente manera:

- Debe contener una serie de caracteres (nucleótidos) con el patrón CACAGTG. Seguido de estas siete letras se deben identificar 23 caracteres aleatorios (nucleótidos); finalizando se identifica el patrón de nueve letras ACAAAAAC.

Estas reglas establecen que existe dentro del segmento V una señal de recombinación y que es posiblemente funcional, si no se identifican completamente las reglas, significa que es no funcional.

3. Reglas para identificar el Péptido Señal

El programa Blast es el encargado de encontrar una aproximación para identificar en este caso el péptido señal. Una vez que se tiene las aproximaciones, el investigador busca, dentro del elemento seleccionado la secuencia en nivel de aminoácidos, las siguientes reglas:

- Se debe buscar la primera M de Metionina, seguido de aproximadamente 15 caracteres a nivel de aminoácidos y se debe finalizar con una G de Glicina.

El experto verifica que dentro de la secuencia no exista algún codón de paro (*) en nivel de aminoácidos. Si llegara a contener un codón de paro, indicaría que no se desarrolló de manera correcta el péptido señal, dando como resultado un segmento V no funcional.

Una vez que se identifican estas reglas, se puede decir que dentro del segmento V se encuentra el péptido señal, por lo tanto, es otro indicativo de un segmento funcional, si no se identifican completamente las reglas se trata de un segmento no funcional.

Posteriormente de haber encontrado cada una de estas reglas, el investigador les asigna una etiqueta a los resultados identificados, así se trate de un segmento V funcional o no funcional. Este proceso se hace de manera repetitiva hasta que no se encuentren más elementos dentro del genoma analizado.

5. CONCLUSIONES

El modelo logró formalizar el proceso de anotación de los expertos en el área de biología molecular del INSP, representando la clasificación del segmento V y su funcionalidad de manera computable y detallada por medio de un diagrama de actividades UML.

Entender el proceso de anotación fue una tarea compleja. La ingeniería del conocimiento fue un apoyo fundamental para los informáticos, facilitando el intercambio de información y la estructuración del conocimiento experto del campo de las ciencias genómicas. El conocimiento adquirido permitirá analizar y eventualmente sistematizar el proceso de anotación en vista de hacer más eficiente este proceso. Un dominio tan complejo como este plantea la necesidad de seguir actualizando el modelo. Se planea desarrollar una nueva versión que logre representar otras partes del segmento V, dependiendo de los tipos de entidades, interacciones y relaciones que resulten, según el caso, se evaluará la posibilidad de migrar a otro modelo más adecuado.

REFERENCIAS

- Birta, L.G. and Arbez, G. (2013) 'Modelling and Simulation'. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2783-3>.
- David W. Embley and Bernhard Thalheim (2011) *Handbook of Conceptual Modeling Theory, Practice and Research Challenges, Handbook of Conceptual Modeling*. Springer Berlin Heidelberg. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15865-0>.
- Duffy, J. (2000) 'Knowledge Management: What Every Information Professional Should Know', *Information Management Journal*, 34(3), pp. 10–10. Available at: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=15352897&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA64715513&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext> (Accessed: 20 March 2023).
- Escribano, J. (2008) *Estructura del genoma humano: perspectivas en biomedicina*. Fuentes, L. and Vallecillo, A. (2004) 'Una Introducción a los Perfiles UML Behavioral types for concurrent objects View project Requirements Engineering conference View project'. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/266276241> (Accessed: 23 February 2023).
- Guizzard, G. et al. (2019) 'Ontology-Based Model Abstraction', *Proceedings - International Conference on Research Challenges in Information Science*, 2019-May. Available at: <https://doi.org/10.1109/RCIS.2019.8876971>.
- H Lents, N. and Ph.D. (2009) *ADN II | Biology | Visionlearning*. Available at: <https://visionlearning.com/es/library/Biologia/2/ADN-II/160> (Accessed: 16 October 2022).
- Hibbard, J. (1997) 'Knowing what we know', *Humans*, pp. 25–34. Available at: <https://doi.org/10.4324/9780203949375-8>.
- Iliopoulos, I. et al. (2003) 'Evaluation of annotation strategies using an entire genome sequence', *Bioinformatics*, 19(6), pp. 717–726. Available at: <https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTG077>.
- Liddle, S.W. (2011) 'Model-Driven Software Development', *Handbook of Conceptual Modeling*, pp. 17–54. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-15865-0_2.
- National Human Genome Research Institute (2019) *Marco abierto de lectura*. Available at: <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Marcoabierto-de-lectura> (Accessed: 11 April 2023).
- Pastor, O., López, M. and Giménez, C. (2012) 'Esquema Conceptual del Genoma Humano: una herramienta para la integración y gestión de su información'. Available at: <https://riunet.upv.es/handle/10251/14390> (Accessed: 9 October 2022).
- Percy Edwin De la Cruz Vélez de Villa, Loayza, D.E.B. and Huamán, M.R. (2010) 'Documentación de Proyectos Con UML 2', *Revista de investigación de Sistemas e Informática*, 7(1), pp. 27–36. Available at: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/sistem/article/view/3263> (Accessed: 19 March 2023).
- Reyes Román, J.F. and Pastor López, Ó. (2018) 'Diseño y Desarrollo de un Sistema de Información Genómica Basada en un Modelo Conceptual Holístico del Genoma Humano'. Available at: <https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/99565>.
- Richard Barker (1990) *El modelo entidad-relación CASE*methodm*. España. Available at: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=hbOTo05ddxAC&oi=fnd&pg=PR11&dq=modelo+entidad+relaci%C3%B3n&ots=F8pWl42tDF&sig=JRZPmJgFVeK2mBgWWc1r_HbSw4c&redir_esc=y#v=onepage&q=modelo%20entidad%20relaci%C3%B3n&f=true (Accessed: 19 March 2023).
- Robinson, J.T. et al. (2023) 'igv.js: an embeddable JavaScript implementation of the Integrative Genomics Viewer (IGV)', *Bioinformatics (Oxford, England)*, 39(1). Available at: <https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTAC830>.
- Robinson, S. et al. (2016) 'Conceptual modeling: Definition, purpose and benefits', *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 2016-February, pp. 2812–2826. Available at: <https://doi.org/10.1109/WSC.2015.7408386>.
- National Human Genome Research Institute (2019) *Secuenciación de ADN*. Available at: <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Secuenciación-del-ADN> (Accessed: 17 April 2023).
- Sirupurapu, V., Safonova, Y. and Pevzner, P.A. (2022) 'Gene prediction in the immunoglobulin loci', *Genome research*, 32(6), pp. 1152–1169. Available at: <https://doi.org/10.1101/GR.276676.122/-/DC1>.
- White, S.A. (2004) *Introduction to BPMN*. Available at: www.bptrends.com.

Propuesta de una aplicación móvil para la detección y seguimiento de medicamentos farmacéuticos

Gerardo Alberto López García*. Jennifer Gomez Velázquez. ** Jennifer Janeth Cid Martinez. ***

*TecNM Campus Iztapalapa III, México, CP. 09630
MEX (Tel: 55-39-27-34-53; e-mail: albertoglg12@outlook.com).

**TecNM Campus Iztapalapa III, México, CP. 09630
MEX (e-mail: jennifergomezburgoa@gmail.com)

Abstract: The proposal is based on Blockchain technology by applying QR codes within a mobile application, its function is to collect information by controlling the distribution of drugs from the laboratory to the pharmacy, providing the certainty that the product has not undergone any changes by the distributor, knowing that it does not come from an authorised distributor

Keywords: Technology, Blockchain, QR Codes, Information, Mobile Application.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS,2019) ha definido que diversos medicamentos han sido falsificados como “un producto etiquetado indebidamente de manera deliberada y fraudulenta en lo que respecta a su identidad y/o fuente”. Asimismo, da a conocer que alrededor del 10% de los medicamentos que se venden en todo el mundo, son falsificados y este problema afecta a países desarrollados, así como también a países en desarrollo.

Por lo que es de imperiosa importancia e interés mundial que se ponga en duda desde su creación y fabricación, tener la certeza de que su descripción está debidamente elaborada, y que debe de ser legible para poder ser observada con claridad a la lectura y a un costado de la caja de presentación y venta para que el consumidor tenga la seguridad de saber el contenido y el consumo que realiza, es decir, deberá contener el gramaje exacto de las fórmulas farmacéuticas, por último, si no han sido modificadas por alguna sustancia tóxica que puede poner en riesgo a nuestra salud.

La problemática de salud es decir en cuanto hace a la definición de las enfermedades, la mala aplicación de tratamientos que consumen los pacientes, que conlleva a estos medicamentos que no son aptos para tratar o prevenir la enfermedad padecida, sin que ellos lo sepan para que puedan prevenir, por la falta de descripción y lectura legible del envasado en el cual esté contenido sea causa especialmente por 2 razones: el lugar de adquisición que puede ser por medio de online, puestos no verificados, de mano a mano y también como subsecuente el robo a farmacias y atraco a distribuidores durante su traslado, así las cosas sufrimos

lamentablemente en el mercado farmacéutico de productos falsificados pueden provocar enfermedades graves o incluso la muerte.

ESTADÍSTICAS DE MUERTE

De acuerdo a datos del INEGI en el año 2010, del total de productos confiscados un 50.6 % fueron muestras médicas; 23.3% medicinas caducadas; 18.5% fraccionadas, 5.3% maltratadas; 1.3% desvíos de la cadena pública y 1.10% eran medicinas falsas o adulteradas.

Por lo tanto, con lo que publica INEGI se percibe el gran número de muertes, dicho eso realizando esta investigación.



Imagen 1. Medicamento falsificado

Después de lo visto, los medicamentos se pueden notar que son modificados en el lote, fecha de caducidad Y número de piezas.

1.1 Objetivos

Diseño de una aplicación para la prevención y combate de medicamentos farmacéuticos falsificados, utilizando la tecnología Blockchain, mediante la verificación de códigos QR

2. DESARROLLO.

A continuación, se desglosa el proceso del desarrollo del prototipo, así como sus requerimientos.

2.2 Tecnología Blockchain

Blockchain es una tecnología que se utiliza para crear registros digitales seguros y descentralizados de transacciones y activos.

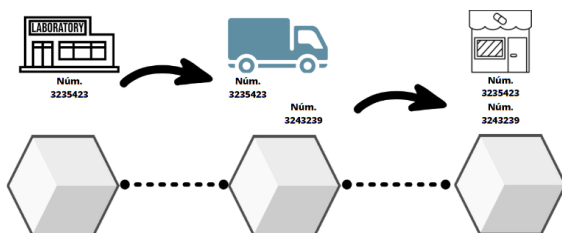


Imagen 2. La utilidad de Blockchain

2.3 Programación

Se utiliza el lenguaje de programación **JavaScript** por ser un lenguaje multiplataforma en conjunto de **Ethereum** que es un software libre

2.4 Códigos QR

Los códigos QR son útiles en muchas situaciones porque ofrecen una forma rápida y sencilla de acceder a la información digital. Algunas de las razones por las que se pueden utilizar códigos QR incluyen:

- Accesibilidad
- Ahorro de tiempo
- Personalización
- Interactividad
- Rastreabilidad

2.5 Funcionamiento de la aplicación

La aplicación comienza a funcionar recopilando información que estará agregando el personal del laboratorio que realiza el empaquetado con los siguientes datos: foto, nombre del medicamento, lote, fecha de caducidad, la cantidad que adquirieron y quien es el proveedor.

El laboratorio que al guardar los datos se creará un código QR protegido por Blockchain, el cual tendrá que imprimirse poniéndolo en el empaquetado de lotes ya que se compran por cantidades grandes. Las funciones del QR que al ser escaneado se direccionará a la aplicación el cual se subirá la ubicación y la información de la persona, con la finalidad de salvaguardando el producto y conocer que ha llegado a su destino.

El siguiente paso de los proveedores después de haberlo escaneado tendrán que llenar la misma información que los laboratorios para que se les cree el nuevo código QR poniéndolo en el siguiente empaquetado.

Así al llegar a la farmacia podrán acceder al proceso de entrega, verificando que los productos no hayan sido manipulados o que reciban un producto que no sea el original.

3. Prototipo

El prototipo de la aplicación se planea cómo en la imagen 3.

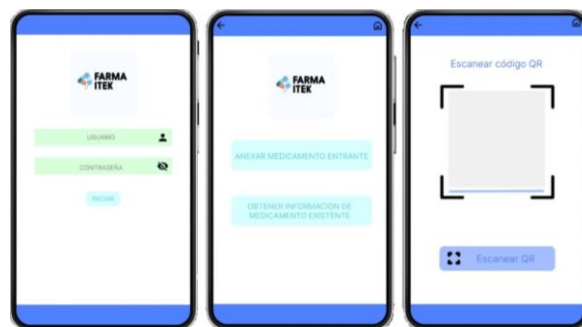


Imagen 3. Prototipo

Beneficio: se les da una seguridad a las empresas de que sus productos que adquirieron son originales, al igual que no han sido manipulados brindando una seguridad a sus clientes, ganando más prestigio, evitando demandas y pérdida de dinero.

4. CONCLUSIONES

Tras las investigaciones de los medicamentos falsificados dando una manera de tener un control sobre la venta y entrada de los productos, teniendo un manejo de donde se adquirieron los productos no autorizados, disminuyendo la compra, venta de medicamentos al igual advirtiendo a la población.

REFERENCIAS

Europa apuesta por Blockchain y los NFT para combatir la falsificación y la piratería (bit2me.com)

Cómo detectar medicamentos falsos, según Cofepris - Infobae

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos | 27 de diciembre de 2022

Cofepris alerta sobre falsificación de 7 medicamentos y venta ilegal de fármaco no autorizado | Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)

PROPUESTA DE GRUPO DE FALSIFICACIÓN. (2013). paho.org. <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2013/GCFM-RutaCritica-1.pdf>

Plataforma RESTful para el procesamiento de imágenes multiespectrales a través de dispositivos móviles

Luis A. Gama-Moreno*, V. Plazola-Soltero*, C. Murguía-Vadillo*,
H. Gastelum*, C. Martínez-Hernández*, F. Ramírez-Ramírez*

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Km 10 carr Tlajomulco,*

*Cto. Metropolitano Sur, 45640 Tlajomulco de Zúñiga, Jal
(Tel: 33 2902 1130; e-mail: luis.gm@tlajomulco.tecnm.mx).*

Abstract: El procesamiento de imágenes digitales ha sido un pilar para la creación de la denominada “Agricultura de Precisión (AP)”, donde el uso de tecnologías de procesamiento remoto a través de satélites y ahora con el uso de vehículos aéreos no-tripulados (llamados Drones), han beneficiado a sectores importantes como lo son la agricultura. En este trabajo se presenta una plataforma de servicios basada en RESTful que le permite a cualquier dispositivo (incluso dispositivos móviles), transmitir, adquirir y procesar imágenes multiespectrales a través de una app denominada NDVIcam. Esta app está basada en el procesamiento del *Índice Diferencial de Vegetación Normalizado* (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) el cual es usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación refleja. Esta app permite a los agricultores mejorar la observación y el cuidado de sus campos de cultivo y con las ventajas de recabar datos en “tiempo real” sobre las diversas variables que influyen en la producción, la reducción del uso de insumos y mano de obra, abaratando los costos; aumento de la calidad del producto; entre otros.

Keywords: RESTful, NDVI, Cómputo-Móvil, Agricultura-Precisión.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de servicios web introducida desde 1993, ha evolucionado la computación distribuida como el punto de partida de una revolución de servicios basados en la Web y en la forma en que concebimos la comunicación entre las aplicaciones. Esta evolución inició con la aparición de protocolos como DCOM (Distributed Component Object Model) introducido por Microsoft y CORBA (Common Object Request Broker Architecture), hasta la aparición de servicios basados en XML (Extensible Markup Language) basado en el protocolo SOAP (Simple Object Access Protocol) y recientemente la aparición de REST/RESTful de un estilo de interfaces de programación (APIs) que describen una interfaz uniforme basadas en el formato de intercambio denominado JSON (JavaScript Object Notation) (Thu, Quang, Nguyen, & Hung, 2022) (Davis & Zhang, 2002). Los elementos clave de los servicios web son: la interoperabilidad, el soporte para la integración eficiente de aplicaciones y la creación de una representación uniforme de aplicaciones dentro de sistemas distribuidos heterogéneos (Curbera, Nagy, & Weerawarana, 2001). En este trabajo se presenta una plataforma de servicios basada en RESTful, proporcionando una interfaz de programación (API) para la administración y procesamiento de imágenes multi-espectrales de cultivos, para la obtención de los índices de Nitrógeno (N) basados en el índice NDVI. Esta plataforma llamada NDVI-REST, está orientada al servicio y procesamiento de imágenes obtenidas por cámaras multiespectrales (Gama Moreno, Plazola Soltero, Murguía Vadillo, Martínez Hernández, & López Carrillo, 2022), para obtener el índice NDVI y de esta

manera facilitar la detección de carencias de nutrientes (en este trabajo solo se determina la deficiencia de Nitrógeno) como técnicas de la AP (Bramley, 2009) (Ehrl & Col., 2003). La plataforma NDVI-REST permitirá a los usuarios la administración de imágenes tomadas a los cultivos, a través de su dispositivo móvil, en cualquier momento y en cualquier lugar, a través de una app diseñada para dispositivos móviles denominada NDVIcam (Gama Moreno, Ramírez Ramírez, Martínez Hernández, Murguía Vadillo, & Torres Rangel, 2018).

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan algunos trabajos relacionados con este proyecto. En la sección 3 se presentan las bases documentales que dan soporte a este trabajo, donde se describen tanto la plataforma RESTful como el prototipo de cámara multiespectral diseñada y la aplicación para dispositivos móviles. En la sección 4 se presenta la interpretación de los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes multiespectrales. Y finalmente se presentan las conclusiones.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Desde su inicio, se han desarrollado bastantes trabajos relacionados con el tema de RESTful, y con respecto al trabajo hecho en el tema de acceso a datos y archivos no se ha quedado atrás. En (Fielding, 2000) se presentan los fundamentos de REST. En (Richardson & Ruby, 2007) se describen metodologías, recomendaciones y presentan buenas prácticas para el desarrollo de aplicaciones basadas en RESTful. Con respecto al acceso a bases de datos, en (Miftakul, Sutrisman, Stiawan, Ermatita, & Masaleno, 2018) se describe la

implementación de un servicio de acceso a una base de datos a través de “e-ID” (Electronic Identity Card) basado en una API RESTful, como una manera de validar la identidad de los usuarios que acceden a los servicios públicos por el gobierno de la República de Indonesia. Asimismo, en (Marinos, Wilde, & Lu, 2010) se presenta una serie de patrones que unen el modelo de base de datos relacional con la arquitectura de la Web basado en RESTful. El objetivo es que las bases de datos relacionales sean accesibles sin pasos intermedios y sin necesidad de metadatos adicionales. Este enfoque puede aumentar enormemente los datos disponibles en la web, haciéndola en sí misma más poderosa. Este trabajo esta enfocado en la construcción de una API RESTful denominada NDVI-REST, para acceder a una base de datos de imágenes multispectrales, para el procesamiento NDVI, si bien, este procesamiento ya se realiza directo en el teléfono móvil del usuario, un trabajo futuro es que la API NDVI-REST, sea capaz de obtener el índice NDVI directamente de las imágenes almacenadas en la base de datos, y de esta manera no depender de un dispositivo externo, si bien es ésta característica una ventaja del actual sistema a través de la app NDVIcam, tener la funcionalidad en ambos lados de las aplicaciones (backend y frontend) aumentará los beneficios de la API NDVI-REST que en este trabajo se describe.

3. PLATAFORMA RESTFUL (NDVI-REST)

3.1 Representational State Transfer (RESTful).

Los servicios web han evolucionado desde su creación. En 2002, el W3C (World Wide Web Consortium) publicó la definición de servicios web WSDL y SOAP. Esto formó el estándar de cómo se implementan los servicios web. En 2004, se publicó la definición de un estándar adicional llamado RESTful. En los últimos años, este estándar se ha vuelto bastante popular. Y ha sido utilizado por diferentes sitios de todo el mundo como son: Facebook y Twitter.

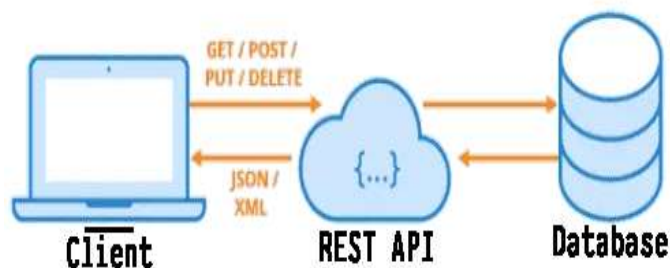


Fig. 1 Arquitectura de un servicio REST/RESTful.

La Transferencia de Estado Representacional (REST) es una arquitectura de software que impone condiciones sobre cómo debe funcionar una API (Fielding, 2000). En un principio, REST se creó como una guía para administrar la comunicación en una red compleja como Internet. Es posible utilizar una arquitectura basada en REST para admitir comunicaciones confiables y de

alto rendimiento a gran escala. Puede implementarla y modificarla fácilmente, lo que brinda visibilidad y portabilidad entre plataformas a cualquier sistema.

Las API que siguen el estilo arquitectónico de REST se llaman API REST. Los servicios web que implementan una arquitectura de REST son llamados servicios web RESTful (ver Fig. 1). Sin embargo, los términos API REST y API RESTful se pueden utilizar de forma indiferente (Hamad, 2010).

3.2 Adquisición de imágenes.

Para la adquisición de imágenes multispectrales se utilizó un prototipo de carcasa “funda” para dispositivos móviles equipada con dos lentes de cámara para obtener imágenes en los espectros Infrarrojo y RGB, conectadas a través de una interfaz micro USB (On-The-Go) (Gama Moreno, Plazola Soltero, Murguía Vadillo, Martínez Hernández, & López Carrillo, 2022). El principal objetivo es capturar imágenes en ambos espectros para poder realizar un procesamiento de píxeles para obtener el índice NDVI que permita determinar el nivel de verdor del objetivo capturado.

El prototipo consiste en dos sensores GC0309 con formato óptico de 1/9 de pulgada, se conectan estos sensores a un multiplexor USB clase 1 a la entrada y un cable con conector Micro USB (OTG) a la salida lo cual permite manejar ambos sensores desde el dispositivo móvil evitando así, la conexión y desconexión de cada sensor para obtener ambas imágenes. Se modifica uno de los lentes substituyendo el espejo “caliente” el cual no permite pasar el infrarrojo cercano (NIR – Near Infrared) y sólo deja pasar al sensor el espectro visible de colores (RGB: Red-Green-Blue) por un espejo “frio” que refleja el espectro visible y sólo deja pasar el espectro infrarrojo (NIR) y así obtener las imágenes en dicho espectro. El otro lente queda sin modificaciones para obtener la imagen en el espectro RGB, así obtenemos una cámara multispectral de bajo costo y altas prestaciones. La Fig. 2-B muestra el prototipo de carcasa que contiene los lentes citados.

3.3 Procesamiento del índice NDVI.

Para obtener el índice NDVI se desarrolló la aplicación denominada NDVICam (Gama Moreno, Ramirez Ramirez, Martínez Hernández, Murguía Vadillo, & Torres Rangel, 2018), la cual se compone por dos elementos: i) una aplicación para dispositivos móviles desarrollada bajo el framework multi-plataforma denominada Firemonkey y generada para las principales plataformas móviles tales como Android e iOS (ver Fig. 2-A), así como para aplicaciones de escritorio tales como Windows y Mac OS, y ii) una cámara dual modificada para capturar imágenes que consta de dos lentes, uno modificado para el espectro infrarrojo (***innovación**) y otro lente normal para capturar los colores RGB (ver Fig. 2-B).

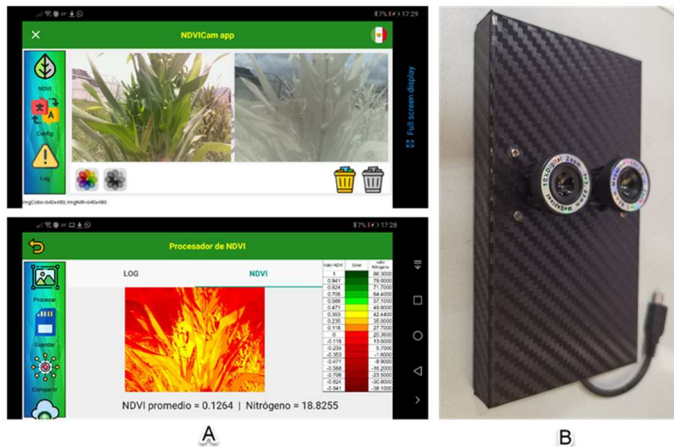


Fig. 2 Aplicación NDVICam y Carcasa de cámara duplex.

3.4 Procesamiento de las imágenes multiespectrales.

NDVICam está compuesto por los módulos siguientes: a) MOD-IMG o módulo de adquisición de imágenes (trabajo futuro), en esta etapa las imágenes son capturadas por el dispositivo de cámara dual que se ejecuta por separado. Cada imagen es tomada y almacenada en el dispositivo, de esta manera el módulo MOD-IMG carga estas imágenes dentro de la aplicación. El módulo b) MOD-READ-IMG o módulo para leer las imágenes y obtener los valores correspondientes al color rojo de la imagen RGB y el valor correspondiente al valor NIR (Near Infrared) o infrarrojo cercano que es el mismo valor rojo, pero de la imagen tomada con el espectro infrarrojo, este módulo se basa en la tecnología de hilos (Threads) para aprovechar las capacidades de multiprocesamiento del sistema operativo, donde cada hilo procesa (lee) una imagen por separado.

El módulo c) MOD-NDVI o módulo para obtener el NDVI el cual realiza el cálculo de cada valor NDVI para cada pixel de ambas imágenes, resultando en una matriz de valores flotantes con los rangos obtenidos por la fórmula de NDVI para finalmente presentar el resultado en una escala de colores conocida como “el rango de valores NDVI”. La Fig. 3 muestra el diagrama de secuencias del procedimiento para procesar las imágenes y obtener el patrón NDVI.

3.5 Interacción con la plataforma NDVI-REST -.

Se desarrolló una plataforma web basada en RESTful para facilitar la administración de las imágenes multiespectrales denominada NDVI-REST. Esta plataforma permite a los usuarios administrar las imágenes en un ambiente web (a través del protocolo HTTP/HTTPS) con la finalidad de simplificar las operaciones CRUD (Create, Read, Update y Delete). La Fig. 4 muestra un diagrama de secuencias que describe la metodología de cómo se realizan el procesamiento de una imagen desde la captura hasta el almacenamiento en “la nube”.

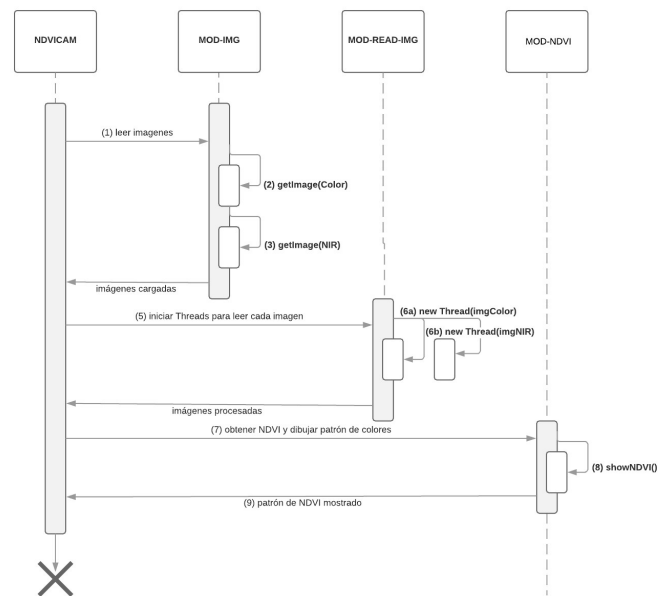


Fig. 3 Diagrama de secuencias para obtener el NDVI.

El proceso inicia con el actor principal que es el usuario, quien toma las imágenes (1) mediante el prototipo de cámara multiespectral definido en (Gama Moreno, Plazola Soltero, Murguía Vadillo, Martínez Hernández, & López Carrillo, 2022), el resultado son dos imágenes de la misma dimensión en píxeles y en resolución, pues son tomadas con el mismo lente, con la diferencia del espectro captado por el filtro de cada lente, una imagen tomada con el lente NIR (infrarrojo cercanos) (2) y la otra imagen captada con el lente RGB (3).

Estas imágenes se transmiten al dispositivo móvil (4) para iniciar el procesamiento del algoritmo NDVI. El actor “Dispositivo Móvil” procesa ambas imágenes mediante la aplicación NDVICam (5) (Gama Moreno, Ramírez Ramírez, Martínez Hernández, Murguía Vadillo, & Torres Rangel, 2018) aplicando la fórmula de obtención del índice NDVI y la relación del nivel de Nitrógeno.

Este resultado es enviado a la plataforma NDVI-REST (6) mediante el protocolo HTTP para su almacenamiento. Una vez que el usuario es autenticado (7, 8); se realiza la carga de información en la base de datos desglosando la información en datos geoespaciales, tipo de espectro utilizado, tamaño de archivo y el correspondiente NDVI obtenido de su procesamiento, con lo que queda disponible para su transmisión o difusión.

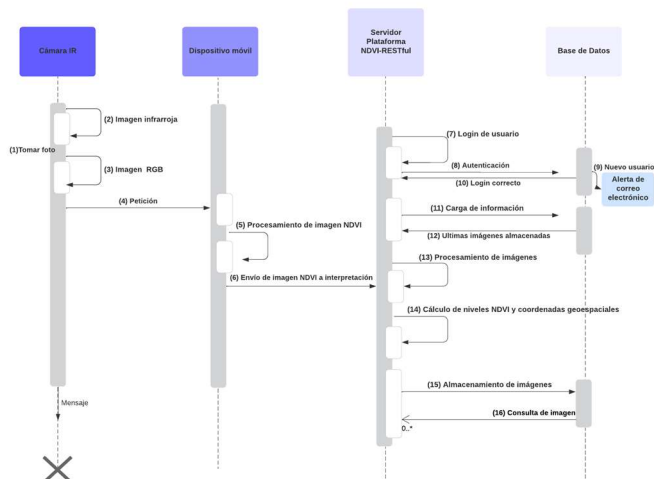


Fig. 4 Diagrama de secuencias para registrar imagen en la plataforma NDVI-REST.

4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Índice NDVI.

El *Índice Diferencial de Vegetación Normalizado* (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index), es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Se calcula a partir de la luz visible e infrarroja cercana 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 (Chávez, Clevers, Verbesselt, Naulin, & Herold, 2014). La vegetación no saludable o escasa refleja más luz visible y menos luz infrarroja cercana (ver Fig. 5).



Fig. 5 Niveles de Infrarrojo reflejado por las hojas.

Casi todos los índices satelitales de vegetación emplean esta fórmula de diferencia para cuantificar la densidad del crecimiento de la planta en la Tierra: radiación infrarroja cercana menos radiación visible dividida por radiación infrarroja cercana

más radiación visible. El resultado de esta fórmula se llama índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Escrito matemáticamente, la fórmula es: $NDVI = (NIR - RED) \div (NIR + RED)$. 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. Un cero significa que no hay vegetación y cerca de +1 (0.8 - 0.9) indica la mayor densidad posible de hojas verdes (Sruthi & Mohammed, 2015).

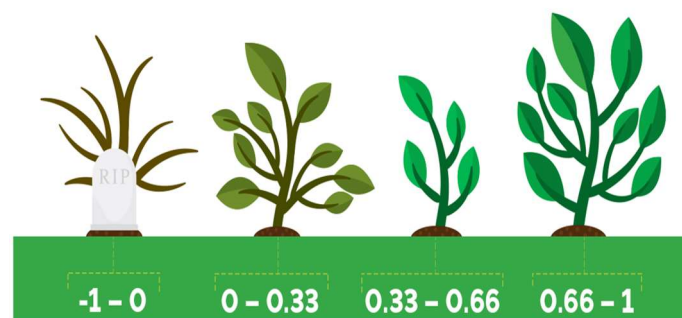


Fig. 6 Valoración de los índices de NDVI.

La Fig. 6 muestra el estado físico de una planta asociado a los rangos de valores obtenidos por el procesamiento del NDVI.

4.2 Pruebas con plantas de calabaza.

Se diseñaron pruebas con diferentes tipos de plantíos, como maíz, fresa y calabaza. En este trabajo se presenta los resultados obtenidos y la interpretación resultado del procesamiento de imágenes descrito en la sección 2 para las plantas de calabaza.

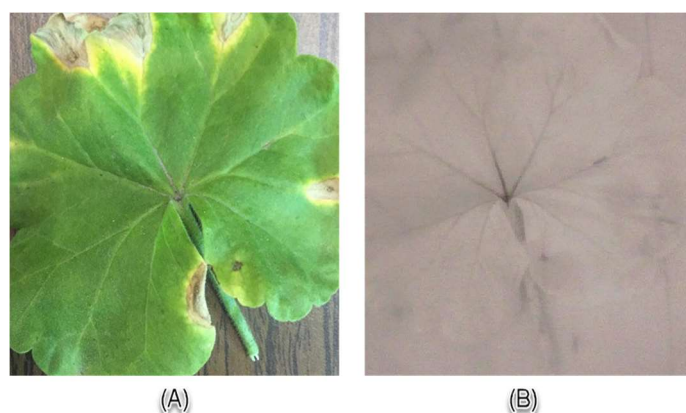


Fig. 7 Imágenes a color (RGB) e Infrarroja de una hoja de calabaza.

La Fig. 7-A representa una imagen de una hoja de calabaza tomada con el lente RGB, y la Fig. 7-B es la misma hoja captada con el lente infrarrojo. Estas imágenes son procesadas con la app NDVIcam (Gama Moreno, Ramirez Ramirez, Martínez Hernández, Murguía Vadillo, & Torres Rangel, 2018) para obtener una imagen que representa las diferentes intensidades de reflexión del espectro NIR (Infrarrojo cercano) representado en

una escala de valores de -1 a 1 representado por colores que van desde el rojo (-1) indicando que en esa zona no existe vegetación, o es una zona de la planta que esta “muerta”, hasta el +1, indicando que esa zona de la planta se encuentra en perfectas condiciones de nutrientes.

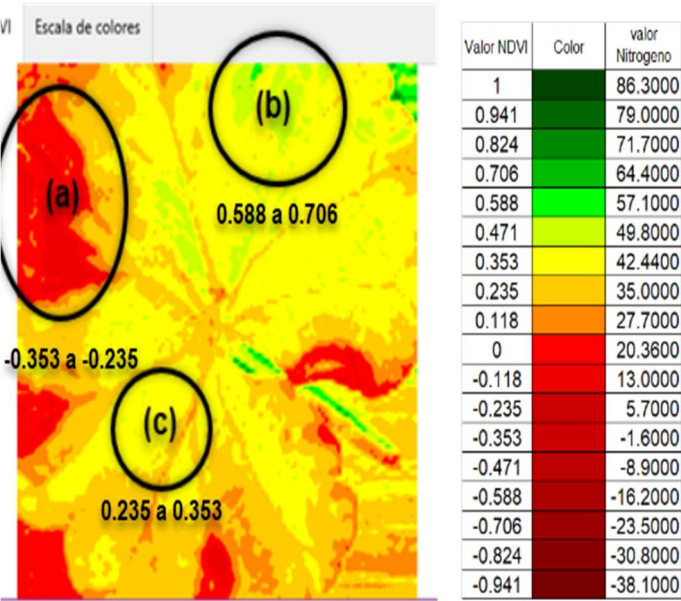


Fig. 8 Imagen que representa los índices NDVI de la planta representada en colores.

En la Fig. 8, se ilustra el resultado obtenido por el procesamiento de imágenes tomadas a hojas de calabaza y la relación del índice NDVI (contenido de clorofila o el “verdor” de las plantas) con el valor de Nitrógeno. Este valor cuantifica los cambios o tendencias sutiles en la salud de las plantas mucho antes de que sean visibles para el ojo humano. La presencia de clorofila en las hojas está estrechamente relacionada con las condiciones nutricionales de la planta y en algunas especies, un valor NDVI alto (≥ 0.5) indicando una planta sana. El contenido de clorofila se incrementa proporcionalmente a la cantidad de Nitrógeno (un importante nutriente) presente en la hoja.

En la región de la Fig. 8(c) se observa un decremento en el valor NDVI lo cual indica un decremento en el contenido de clorofila y la concentración de nitrógeno. Este decremento puede ser debido a una carencia de nitrógeno disponible en el suelo, lo que se puede solucionar agregando más fertilizante al suelo en esa región. En la región de la Fig. 8(a) se muestra un color “rojizo” lo cual indica que en esa parte de la imagen no existe verde, lo cual puede ser el suelo, agua o cualquier otro objeto ajeno a un organismo vegetal, y si es el caso de existir vegetación, el color indica que estaría “muerta” esa región de la planta, como sucede normalmente en los bordes secos de la hoja. En la región de la Fig. 8(b) se aprecian pequeños destellos de color verde, lo que indica zonas con suficientes nutrientes. La escala de valores de Nitrógeno asociados a valores <0 no son representativos.

4.3 Pruebas con plantas de maíz.

La Fig. 9-A representa una imagen de una planta de maíz tomada con el lente RGB, y la Fig. 9-B es la misma hoja captada con el lente infrarrojo.



Fig. 9 Imágenes a color (RGB) e Infrarroja de una planta de maíz.

El procesamiento de estas imágenes con la aplicación NDVICam, arroja el resultado que se muestra en la Fig. 10. Donde es posible visualizar las zonas con colores “rojizos”, como se muestra en la Fig. 10(a), que indican que en esa región de la imagen no hay presencia de vegetación; y los colores “amarillentos” representan rangos de valores entre $+0.24$ a $+0.35$ lo que indica que en esa región de la planta presenta deficiencias de nutrientes o algún tipo de anomalía en los nutrientes. Y en la zona de la Fig. 10(b) el rango de valores del NDVI es de 0.11 a 0.23 con una correlación de 27.7 a 35 unidades de Nitrógeno.

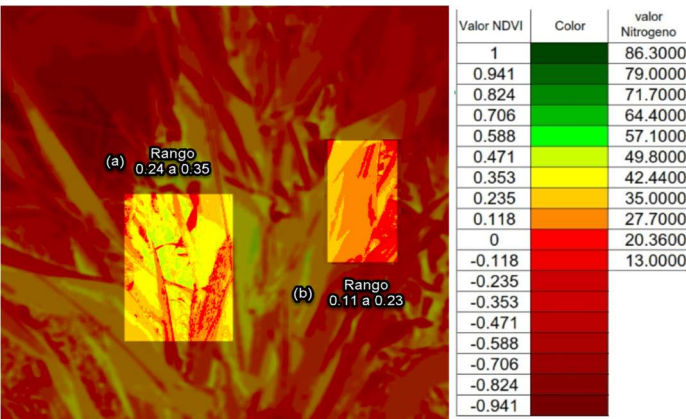


Fig. 10 Resultado del proceso para obtener el NDVI en la planta de maíz.

Estas lecturas se denominan “no-invasivas” ya que solo implica sujetar la cámara dual y capturar las imágenes sobre el tejido frondoso y así recibir una lectura indexada NDVI asociada al contenido de clorofila. El contenido de clorofila y la absorción de Nitrógeno se han correlacionado con las unidades obtenidas por el dispositivo comercial SPAD-502 (\$3,000 USD aprox.) diseñado para obtener valores de clorofila y N. Existe una clara correlación entre las mediciones del NDVI y el contenido en nitrógeno en la hoja. Se encontró que la intensidad del color de

las hojas está directamente relacionada con el contenido de clorofila y de la cantidad de nitrógeno en la hoja. Con estos valores se puede reducir el riesgo de deficiencias limitantes del rendimiento y reducir costos con respecto a fertilización.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el proceso para la interpretación de imágenes multiespectrales para obtener el índice NDVI que permite detectar deficiencias de nutrientes en cualquier cultivo. A través de diversas herramientas diseñadas desde una plataforma de servicios basados en la API RESTful, para permitir la administración y manipulación de imágenes multiespectrales, tomadas a cultivos controlados como: maíz, calabaza, fresa, entre otros; a través de una cámara dual modificada de bajo costo, que captura imágenes del espectro infrarrojo (**innovación*) y los colores RGB. Hasta las aplicaciones para procesarlas usando dispositivos móviles con la aplicación NDVICam, donde es posible determinar el índice NDVI y una correlación del índice de Nitrógeno (un trabajo futuro es agregar otros nutrientes como fósforo, potasio y otras magnitudes como los son la temperatura y humedad del medio de cultivo, así como la incorporación de estos instrumentos a invernaderos para complementar su tecnificación). Las ventajas de usar la cámara dual y la app NDVICam, es que le permiten al agricultor 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 permite tomar decisiones directamente en el campo en cualquier momento y en cualquier lugar.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló dentro del proyecto de investigación financiado por TecNM: "Plataforma de servicios RESTful para una base de datos de diagnóstico nutricional relacionado con las etapas fenológicas de cultivos" Clave: 15089.22-P. Dentro del Instituto Tecnológico de Tlajomulco.

7. REFERENCIAS

- Bramley, R. G. (2009). Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop & Pasture Science*, 60(3), 197–217.
- Chávez, R., Clevers, J., Verbesselt, J., Naulin, P., & Herold, M. (2014). Detecting leaf pulvinar movements on NDVI time series of desert trees: A new approach for water stress detection. *PLoS One*, pp.1-12.
- Curbera, F., Nagy, W., & Weerawarana, S. (2001). Web Services: Why and How.
- Davis, A., & Zhang, D. (2002). A comparative study of DCOM and SOAP. *Fourth International Symposium on Multimedia Software Engineering, 2002. Proceedings.* (pp. 48-55). Newport Beach, CA, USA: doi: 10.1109/MMSE.2002.1181595.
- Ehrl, M., & Col. (2003). Quality assessment of agricultural positioning and communication systems. Precision agriculture: Proceedings of the 4th European conference on precision agriculture. (2003). In J. V. Stafford (pp. 205–210). Wageningen, The Netherlands: A. Werner.
- Fielding, R. (2000). Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. *PhD Dissertation*. University of California, Irvine, CA, USA.
- Gama Moreno, L. A., Plazola Soltero, V. H., Murguía Vadillo, C. G., Martínez Hernández, C., & López Carrillo, E. (2022). Prototipo de Cámara Infrarroja para obtener el Índice NDVI en Agricultura de Precisión. *Revista Programación Matemática y Software, Vol. 14.*(1), pp. 9-21. ISSN (e): 2007-3283. Indexada por LatinIndex. Retrieved from <http://www.progmat.uaem.mx:8080/Vol14num1/vol14no1art2.pdf>
- Gama Moreno, L. A., Ramírez Ramírez, F., Martínez Hernández, C., Murguía Vadillo, C. G., & Torres Rangel, J. Á. (2018). NDVICam, aplicación para monitoreo de cultivos basado en el índice NDVI a través de dispositivos móviles. *Revista Electrónica Coloquio Internacional de Investigación Transdisciplinaria, Vol. III. ISSN 2448-7104*, 174-181.
- Hamad, H. S. (2010). Performance Evaluation of RESTful Web Services for Mobile Devices. *Int. Arab. J. e Technol.*, 1(3), 72-78.
- Marinos, A., Wilde, E., & Lu, J. (2010). HTTP database connector (HDBC): RESTful access to relational databases. *The Web Conference*.
- Miftakul, M., Sutrisman, A., Stiawan, D., Ermatita, & Masaleno, A. (2018). Design Restful Web Service ff National Population Database for Supporting E-Health Interoperability Service. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 96(15), pp. 4794-4805.
- Richardson, L., & Ruby, S. (2007). *RESTful Web Services*. O'Reilly Media.
- Sruthi, S., & Mohammed, A. M. (2015). Agricultural drought ana. using the NDVI. *Aquatic Procedia*, pp. 1258–1264.
- Thu, D., Quang, L., Nguyen, D., & Hung, P. (2022). A Method of Automated Mock Data Generation for RESTful API Testing. *2022 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF)* (pp. 376-381). Ho Chi Minh City, Vietnam: doi: 10.1109/RIVF55975.2022.10013835.

Marco de Servicios Web para el seguimiento de fugas de agua en tuberías de distribución.

Christian Omar Ortiz Salvador, Juan Carlos Rojas Pérez, Humberto Hernández García.

TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. 62490 México (Tel: 993-459-8058; e-mail: ({m22ce004, juan.rp}@cenidet.tecnm.mx, hhg@cenidet.edu.mx)

Abstract: En esta última década, se han desarrollado distintos tipos de técnicas y tecnologías para abordar el problema de fugas de agua en tuberías de distribución dedicadas a intentar reducir las pérdidas de agua que se genera anualmente. Es decir, solucionar este problema es complejo, representa un desafío importante para los proveedores de servicios de agua no solo en México sino también en todo el mundo, si el porcentaje de pérdida se reduce considerablemente se puede alargar la vida útil de este vital líquido. Este artículo presenta un marco de servicios web, la cual es herramienta tecnológica para abordar el problema de las fugas de agua en tuberías de distribución utilizando datos geoespaciales.

Keywords: Fugas de agua, servicios web, técnicas para disminuir las fugas de agua, TIC.

1. INTRODUCTION

El suministro de agua potable es uno de los recursos más valiosos del planeta. Su conservación es fundamental para garantizar la sostenibilidad y el bienestar de las comunidades. Existe una incertidumbre entre la medida que corresponde a fugas en la tubería y la medida que corresponde a abusos de usuarios (alteración de medidores). Lo anterior se discutió de manera personal en el sistema de agua del valle de México (GCRF et al., 2021). De acuerdo con datos del sitio del INEGI, En México al 2015, el porcentaje de viviendas con disponibilidad de agua entubada fue de casi 95%, el resto se abastecía de agua por acarreo fuera de la vivienda, por ejemplo: de la llave comunitaria, otra vivienda, una pipa, de pozo, de un río, entre otros.

En cuanto a drenaje a nivel nacional, en 1990, el 62% de las viviendas contaban con drenaje, el porcentaje se elevó a 75% en el año 2000, para 2005 fue de 85% y en 2010 se ubicó en 89 por ciento. Las entidades con el menor porcentaje de viviendas que cuentan con este servicio son Guerrero y Oaxaca con 72 y 70% respectivamente, al 2015 todos los estados cuentan con más de 90%. Esto a pesar de ser bueno para las personas que ya tienen acceso a este vital recurso, también es algo perjudicial ya que aumenta el porcentaje de pérdidas agua debido a las fugas de agua en tuberías de distribución.

Sin embargo, la pérdida de agua por fugas en las tuberías de distribución representa un desafío importante para los proveedores de servicios de agua no solo en México, también en todo el mundo, con las fugas no solo se desperdicia este recurso vital, sino que también se generan costos significativos en términos de energía y mantenimiento de infraestructuras. En el área del desarrollo de sistemas de software se han generado principios y metodologías para el proceso de construcción y mantenimiento de sistemas computacionales con el fin de que sea un desarrollo rentable y que la operación de estos sistemas sea fiable para su propósito (Xu et al., 2014). Para especificar dichos principios se ha considerado la manera de aplicar el conocimiento a los procesos de sistemas que aborden las fugas de agua. De acuerdo con una investigación realizada a través de los sitios web de cada estado de México con respecto a la información para el control de fugas de agua en tuberías de distribución, se encontró que algunos estados como Aguascalientes (Veolia et al., 2023), Campeche (SMAPAC et al., 2023), Durango (AMD et al., 2023), Tabasco (CEAS et al., 2023) y Yucatán (RETS et al., 2023) permiten generar reportes de las fugas a través de un sistema de forma manual, sin embargo, no presentan un seguimiento de fugas de agua a través del mismo sistema y en los demás estados esta la forma tradicional de reporte a través de una llamada telefónica. En este artículo se presenta el desarrollo de un marco de servicios web para abordar el problema de fugas de agua en tuberías de distribución. Este se representa como una herramienta

tecnológica que aborde el problema del desperdicio de agua por fugas en tuberías de distribución mediante el registro de datos geoespaciales y el seguimiento a las fugas reportadas.

2. Trabajos relacionados

2.1 Monitoreo en tiempo real

La implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real puede ayudar a detectar las fugas de agua en las tuberías de distribución de manera más eficiente. Estos sistemas utilizan tecnologías avanzadas para monitorear el flujo de agua en las tuberías y detectar las fluctuaciones que podrían indicar fugas de agua. En el sistema propuesto en (Jonathan et al., 2008) se presenta un prototipo de una biblioteca de servicios web para el National Water Information System (NWIS), en este se puede recaudar información sobre el agua, es un depósito en línea de datos históricos y observaciones en tiempo real. Este sistema permite reducir el tiempo requerido para acceder, obtener e integrar datos de diferentes fuentes y así se pueda realizar la localización rápida del recurso más apropiado. Otro enfoque, se presenta en (Khattar et al. 2014) utilizando la misma técnica, mediante el intercambio de datos de agua basado en estándares OGC (Open Geospatial Consortium) existentes para la codificación de datos vectoriales. Con este acceso dinámico a bases de datos hidrológicos a través de interfaces web estandarizadas, se facilita el uso de modelos de simulación intensivos en datos y sistemas de apoyo a la toma de decisiones, el sistema presentado en esta investigación es llamado WaterOneFlow.

En la búsqueda de mejorar este enfoque “análisis de fugas mediante el análisis de datos” se propuso agregar un paso adicional al proceso tradicional de fugas de agua. Los cuales son evaluación, detección y localización (física). Se realizó una mejora en los procesos de gestión de fugas mediante la adopción de técnicas de análisis de datos y simulación hidráulica (Candelieri et al. 2013).

2.2 Inspección regular de las tuberías para su detección temprana.

La inspección regular de las tuberías puede ayudar a identificar y reparar las fugas de agua antes de que se conviertan en un problema importante. La capacitación del personal es crucial para la prevención y detección de fugas de agua. artículo de (Xu et al. 2014) se presenta una revisión exhaustiva de los enfoques de control de fugas de agua de última generación

como son detección activa de fugas, el mantenimiento óptimo de las tuberías deterioradas y la regulación de la presión del agua. Que en este caso podría ayudar al personal que trabaja en el mantenimiento y la reparación de las tuberías a estar más capacitado en la detección de fugas de agua, el mantenimiento de las tuberías y el uso de las tecnologías de reparación de fugas de agua.

2.3 Métodos de mantenimiento preventivo y predictivo de fugas de agua.

Un programa de mantenimiento preventivo y predictivo bien diseñado puede ayudar a reducir las fugas de agua y prolongar la vida útil de las tuberías. Uno de los métodos preventivos para fugas de agua es revisar las estadísticas de daños causados en climas exteriores fríos. Esto se hace mediante un análisis de las estadísticas empíricas de daños mediante una revisión de la literatura científica. La investigación de (Mattsson et al., 2021) permite examinar en qué medida los climas fríos afectan el número y los costos de los daños causados por el agua.

2.4 Tecnologías de detección de fugas de agua.

La detección temprana de fugas puede ayudar a reducir el desperdicio de agua. Los servicios web (SW) son una parte esencial de las nuevas tecnologías, un ejemplo es el SW desarrollado para una plataforma que gestiona la demanda de agua urbana. El sistema utiliza un servicio de adquisición de datos para ingresar lecturas de medidores inteligentes y también utiliza servicios web que permiten a los usuarios recuperar datos utilizando direcciones web (M.G. Barry et al. 2014). La tecnología que más se ha encontrado en la búsqueda de estas investigaciones es el uso de Arduino, por ejemplo, en el trabajo de (Tina et al. 2022) se presenta un sistema de IoT que se basa en sensores de flujo integrado con Arduino para detectar la fuga de agua en las tuberías, este toma en cuenta el principio de la presión del agua que se genera dentro de la tubería, el resultado indica que el volumen de agua generado en el punto de inicio se puede comparar con el otro extremo para determinar si hay alguna fuga.

2.4 Gestión eficiente del agua.

Una gestión eficiente del agua puede ayudar a reducir la cantidad de agua que se pierde debido a fugas. Por ejemplo, un enfoque basado en la web para respaldar la gestión de recursos hídricos para predecir la escorrentía para cuencas de drenaje

calibradas, derivadas de los datos de deshielo observados mediante el uso de datos de entrada tanto de observaciones in situ como de EO (Earth Observation). Este servicio web permite a los usuarios expertos seleccionar y realizar un modelo de recursos hídricos para una cuenca concreta de estudio (Díaz et al. 2007). La investigación SMART-WATER tiene como objetivo fomentar las empresas de servicios públicos de agua mejorando la gestión del agua. El objetivo es el registro frecuente y la transmisión inalámbrica de datos de consumo de agua (telemetría automatizada inteligente) combinados con el control remoto del suministro de agua casi en tiempo real (Antzoulatos et al. 2020)

Se realizó una investigación de los sitios web de las 32 entidades federativas de México, la cual arroja información respecto al estado en el cual se encuentra el método de reporte de fugas de agua y como es su administración. En la mayoría de los entidades federativas del país se ofrecen los siguientes métodos: llamada telefónica, con este método mediante una conexión telefónica a la comisión de agua potable y alcantarillado se puede realizar el reporte de fuga de agua reportando detalles como ubicación, código postal o información relevante, la desventaja de este método es que es un proceso ligeramente lento, las líneas telefónicas están casi siempre ocupadas o fuera de línea; otro método es el reporte en oficinas de atención al cliente, esta forma de realizar un reporte de fuga de agua es la mas lenta ya que el usuario debe ir directamente a las oficinas a realizar el proceso de manera física y se puede encontrar con largas filas o que el reporte no sea procesado correctamente y al final de cuentas no se realice la reparación. Otro método que se está impulsando en algunos estados es que las empresas proveedoras de agua pueden aceptar reportes de fugas de agua a través de sus cuentas en redes sociales como Facebook, Twitter o WhatsApp, este reporte de fugas de agua se realiza por medio de un mensaje directo entre el usuario y la empresa responsable de la fuga de agua que al igual que los otros métodos se realiza manualmente el reporte y el almacenamiento de este reporte en las oficinas correspondientes, esto puede llevar a un control incorrecto de todos estos reportes de fugas de agua que realiza el usuario. Sin embargo, en algunos estados como Aguascalientes, Campeche, Durango, Tabasco y Yucatán permiten generar reportes de las fugas a través de un sistema web ingresando los datos de forma manual para subir el reporte de fuga de agua a través de un sistema, aunque no presentan un seguimiento de los reportes de fugas de agua a través de sus sistemas, no se muestra como procede ese reporte de fuga de agua después de realizarlo.

De acuerdo a la investigación anterior, se propuso un marco de servicios web para abordar este problema, el cual no solo ayuda a tener un sistema que puede guardar los reportes de fugas de agua sino también a organizarlos para tener un mejor control y tener un seguimiento de ellos tanto para el usuario como para el administrador. Además, con el marco de servicios web se da una mayor eficiencia en el proceso de reporte, ya que se pueden automatizar y simplificar los procesos de reporte de fugas de agua, lo que permite que los usuarios puedan realizar sus reportes de forma más rápida y sencilla. Con el marco de servicios web, se pueden establecer campos obligatorios y validaciones que aseguren que los reportes contengan toda la información necesaria para su procesamiento y solución, lo que reduce la posibilidad de errores y omisiones en los reportes. También, establece mecanismos de seguimiento y trazabilidad de los reportes, lo que permite a las autoridades, organismos responsables y usuarios conocer el estado de cada reporte y su avance en el proceso de solución. El marco de servicios web permite la integración con otros sistemas y plataformas, lo que puede ser útil para compartir información relevante o para colaborar con otras entidades o instituciones.

3. Propuesta de solución

Se diseñó e implementó un Marco de Servicios Web para Fugas de Agua en Tuberías de Distribución (MSWFATD), el marco se basa en desarrollar una plataforma en línea (a través de una computadora o dispositivo móvil) que permite a los usuarios reportar las fugas de agua en tuberías de distribución en el lugar donde ocurre la fuga. El marco MSWFATD incluye un formulario en línea en el que los usuarios pueden reportar las fugas de agua, mediante campos obligatorios y validaciones para garantizar que los reportes contengan la información necesaria para su procesamiento y solución. Además, se establece un servicio de seguimiento y trazabilidad de los reportes, lo que permitirá a las autoridades y organismos responsables conocer el estado de cada reporte y su avance en el proceso de solución.

El marco MSWFATD recopila datos precisos y detallados sobre las fugas de agua reportadas, lo que puede ser útil para la toma de decisiones en cuanto a la asignación de recursos, la priorización de tareas de mantenimiento y reparación, así como el seguimiento de las fugas.

3.1 Diseño

En la ilustración 1 se muestra el diagrama UML de casos de uso (StarUML et al., 2023) del MSWFATD. Se muestra los distintos escenarios con los que el usuario puede interactuar para realizar sus respectivas actividades como son: Generar reporte y Consultar reporte, y como estos eventos desencadenan otros.

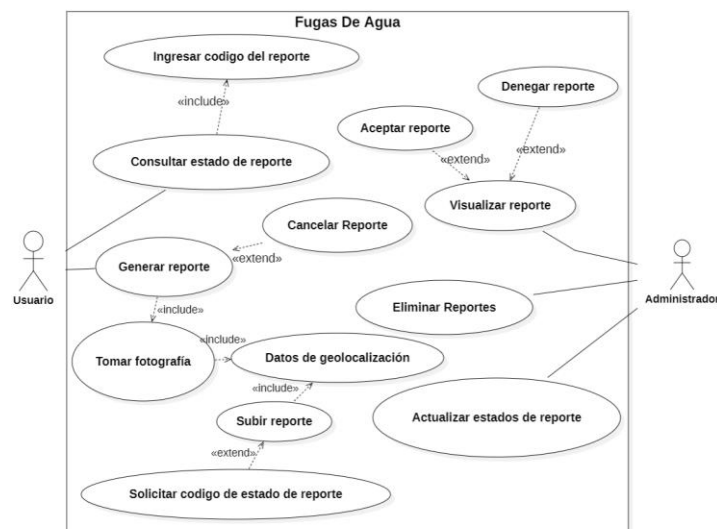


Ilustración 1 Diagrama UML de casos de uso.

En la ilustración 2 se muestra el diagrama de despliegue, modelo físico de los artefactos de software en nodos de hardware y cómo se comunican entre ellos (StarUML et al., 2023).

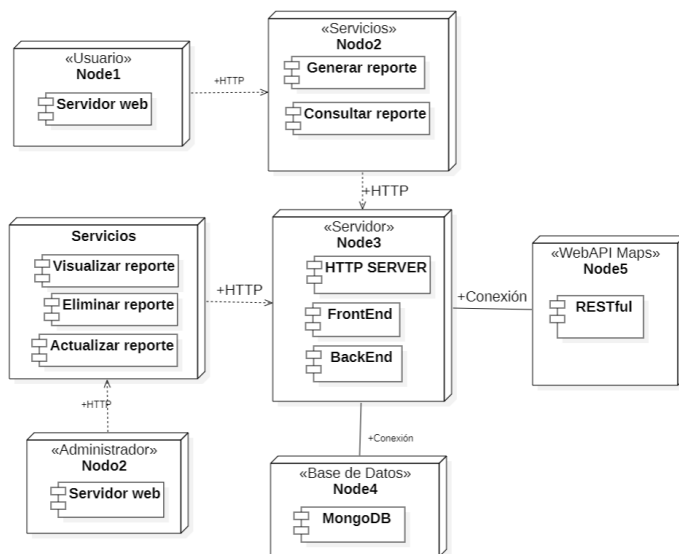


Ilustración 2 Diagrama UML de despliegue.

A partir del servidor principal se puede observar como a través de servicios el usuario y el administrador se pueden comunicar con el sistema, este mismo servidor solicita datos y funciones a una API, para que toda esta información sea guardada en una base de datos, la cual también se encuentra conectada al servidor principal y esta recibe o envía datos.

3.2. Implementación del MSWFATD.

El marco MSWFATD se implementó utilizando Node.js (Node.js et al. 2023) para generar los servicios con la ayuda de un framework llamado Express (Express et al. 2023). NodeJs utiliza un entorno de código abierto y multiplataforma que permite ejecutar código JavaScript fuera del navegador web. Por otra parte, con el Framework React se generó la interfaz del cliente que permite consumir los recursos del sistema (React.dev et al., 2023), React usa el lenguaje base llamado JSX (JavaScript XML). El marco MSWFATD consta de dos servicios web para el usuario: el servicio de “Reportar fuga” y el servicio de “Consulta de fugas”; y tres servicios web para el administrador: el servicio de “Eliminar fugas”, también el servicio de “Actualizar reporte” y por ultimo el servicio de “Visualizar reporte”. Como se puede apreciar en las ilustraciones 1 y 2, estos servicios cuentan con sus propias interfaces. Para el usuario existen dos interfaces en donde pueden encontrar información acerca del sistema. También cuenta con la interfaz Contacto donde se encontrará información de los números telefónicos para reportar fugas de agua de cada estado. Para finalizar, se consume una API de mapas para uno de los servicios del usuario que lleva por nombre reportar fugas de agua. Toda la información recabada del marco de servicios web se almacena en una base de datos MongoDB (MongoDB et al., 2023).

El Sistema se desarrolló sobre Visual Studio Code, el cual es considerado un IDE (Entorno de Desarrollo Integrado). Visual Studio Code no incluye una compilación nativa, si no que utiliza herramientas externas para realizar la compilación de código. (VSC et al. 2023).

6. Pruebas.

Con el servicio “Reporte de Fuga” se espera que el autocompletado de GoogleMaps agilice el proceso de reporte de fugas de agua alentando así a que los usuarios colaboren en el cuidado de este valioso material a través de sus reportes generados.

La latitud y longitud son las coordenadas geográficas que se utilizan para ubicar un punto en la superficie de la Tierra.

Juntos, la latitud y longitud proporcionan una forma precisa de ubicar cualquier punto en la Tierra y son fundamentales para la navegación, la cartografía y la localización geográfica en general. A continuación, se presentan algunas pruebas preliminares del marco MSWFATD.

6.1 Pruebas

La API de Google Maps se utiliza ampliamente en todo el mundo por empresas y desarrolladores para integrar mapas y servicios de ubicación en sus aplicaciones. La función de la API de Google Maps es una parte fundamental en el desarrollo de este marco de servicios web. Las pruebas de la API de Google Maps se enfocaron en asegurar que los servicios proporcionados por la API, como la visualización de mapas, la búsqueda de direcciones y la navegación, fueran precisos y fiables en tiempo real (Google Maps Platform et al. 2023).

En la Ilustración 3, Google Maps se encarga de autocompletar la localización de una fuga, lo cual permite agilizar la creación del reporte.

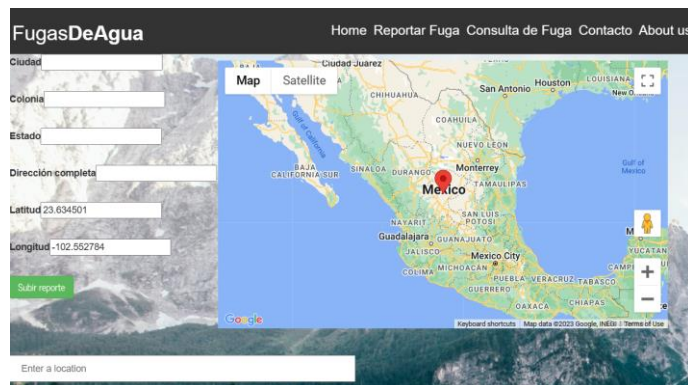


Ilustración 3 Reportes de localización de fuga en tiempo real.

En la ilustración 4, al mover el cursor en el mapa la API actualiza la información de los recuadros y los vuelve a llenar

con la nueva información en la que este ubicado el cursor.

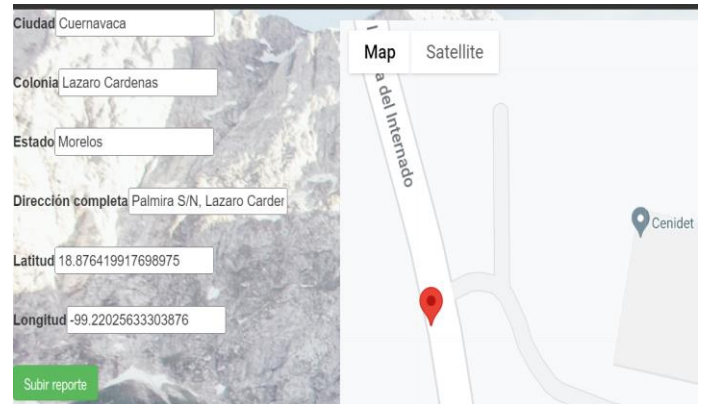


Ilustración 4 Autocompletado utilizando el marcador.

6.2 Almacenamiento del reporte de fuga de agua

Al subir el reporte al sistema se otorga un ID específico para el reporte, con el cual se podrá realizar un seguimiento del proceso en el que se encuentra el estado del reporte realizado como se observa en la Ilustración 5.



Ilustración 5 Mensaje de estatus del reporte.

Esto manda una solicitud a la base de datos MongoDB, la cual crea el documento donde se guarda la información correspondiente como se observa en la Ilustración 6.

ADD DATA EXPORT COLLECTION

```
{
  "_id": {"_id"},
  "city": "Cuernavaca",
  "area": "Lazaro Cardenas",
  "state": "Morelos",
  "address": "Palмира S/N, Lazaro Cardenas, 62490 Cuernavaca, Mor., Mexico",
  "idReporte": "lgmvnthc",
  "markerPosition": {
    "lat": 18.876419917698975,
    "lng": -99.22025633303876
  },
  "estadoReporte": "Pendiente"
}
```

Ilustración 6 Datos almacenados en MongoDB.

Para poder realizar un seguimiento a los reportes de fugas de agua en tuberías de distribución se creo el servicio web de consultas, en el cual el usuario podrá saber el estado en el que se encuentra el reporte realizado. Este paso no es obligatorio para todos los usuarios ya que se podrá tener la opción de querer o no realizar un seguimiento como se muestra en la ilustración 7. El sistema de servicios web recopila datos precisos y detallados sobre las fugas de agua reportadas, lo que puede ser útil para la toma de decisiones en cuanto a la asignación de recursos, la priorización de tareas de mantenimiento y reparación.


Buscar reporte


lgmvnthc

Buscar

Ciudad: Cuernavaca
 Colonia: Lazaro Cardenas
 Estado: Morelos
 Dirección completa: Palmira S/N, Lazaro Cardenas, 62490 Cuernavaca, Mor., Mexico
 El ID del reporte es: lgmvnthc
 El estado del reporte es: Pendiente

Ilustración 7 Consulta de reporte fugas de agua.

A través del servicio de obtener las consultas de fugas de agua se genera una solicitud a la base de datos y se obtienes los datos de la ilustración 8 y a través del sistema se decodifican a manera que el usuario pueda verlo desplegado en su interfaz como se muestra en la ilustración 7.

Buscador.jsx:21

```
{...}
0: {
  address: "Palмира S/N, Lazaro Cardenas, 62490 Cuernavaca, Mor., Mexico"
  area: "Lazaro Cardenas"
  city: "Cuernavaca"
  estadoReporte: "Pendiente"
  idReporte: "lgmvnthc"
  markerPosition: {lat: 18.876419917698975, lng: -99.22025633303876}
  state: "Morelos"
  _id: "643f2346405e54308b48fe7b"
  [[Prototype]]: Object
  length: 1
  [[Prototype]]: Array(0)
}
```

Ilustración 8 Datos devueltos por MongoDB

7. Conclusiones y trabajos futuros.

La disminución de fugas de agua en las tuberías de distribución es un objetivo importante para la conservación del agua. La implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real, la inspección regular de las tuberías, el mantenimiento preventivo, marcos de trabajo, servicios web, análisis de datos, las tecnologías de reparación de fugas de agua y la capacitación del personal son algunos de los métodos de apoyo que pueden ayudar a lograr este objetivo, contribuyendo cada uno por separado, al implementar estos métodos. Con este proyecto se espera que pueda reemplazar los diferentes sistemas de control de reportes de fugas de agua con los que actualmente se cuenta en México, teniendo así un mejor manejo de esta información y un mejor control, animando así a las personas a contribuir al país teniéndolos en cuenta como parte del proceso de la reparación al poder ellos dar seguimiento a sus reportes. Además, al implementar este enfoque se puede generar una red muy amplia en donde diferentes organismos gubernamentales pueden hacer uso de ella, sin tener que utilizar un cliente específico. Se planea en un futuro llevar a cabo una campaña de difusión y promoción de la plataforma para asegurar que los usuarios estén informados y motivados a reportar las fugas de agua, y se ofrecerá un canal de atención al usuario para aquellos que requieran asistencia adicional.

REFERENCES

- American Water Works Association. (2017). *AWWA Water Loss Control Committee*. AWWA Water Loss Control Committee Best Practices.
- Hu, Z., Chen, B., Chen, W., Tan, D., & Shen, D. (2021). Review of model-based and data-driven approaches for leak detection and location in water distribution systems. *Water Supply*, 21(7), 3282-3306.

- Ibrahim, K., Tariq, S., Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2021). Application of fiber optics in water distribution networks for leak detection and localization: a mixed methodology-based review. *H2Open Journal*, 4(1), 244-261.
- National Environmental Services Center. (2017). Water Loss Control. West Virginia University.
- Jonathan L. Goodall, Jeffery S. Horsburgh, Timothy L. Whiteaker, David R. Maidment, Ilya Zaslavsky. (2008). A first approach to web services for the National Water Information System, Environmental Modelling & Software.
- Khattar R., P. Ames D., "A Web Services Based Water Data Sharing Approach using Open Geospatial Consortium Standards," Open Water Journal – Volume 6, Issue 1, 2014.
- Candelieri, A., Archetti, F., & Messina, E. Improving leakage management in urban water distribution networks through data analytics and hydraulic simulation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 171, 107-117, 2013
- M.G. Barry, M.E. Purcella, B.J. Ecka, J. Hayesa, and E. Arandia, "Web Services for Water Systems: the iWIDGET REST API," *Procedia Engineering*, Elsevier, pp.1120 – 1127, 2014.
- Tina, J. S., Kateule, B. B., & Luwemba, G. W. Water Leakage Detection System Using Arduino. *European Journal of Information Technologies and Computer Science*, 2(1), 1-4, 2022.
- Mattsson, C., Nordquist, B., Johansson, D., Wallentén, P., & Bagge, H. Water damages in HVAC, tap water and sewage systems in cold climates. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 246, p. 12001). EDP Sciences, 2021.
- Díaz, L., Costa, S., Granell, C., & Gould, M. Migrating geoprocessing routines to web services for water resource management applications. *AGILE 2007 Proceedings*. Aalborg: AGILE, 2007.
- Antzoulatos, G., Mourtziou, C., Stournara, P., Kouloglou, I. O., Papadimitriou, N., Spyrou, D., ... & Kompatsiaris, I. Making urban water smart: the SMART-WATER solution. *Water Science and Technology*, 82(12), 2691-2710, 2020.
- Xu, Q., Liu, R., Chen, Q., & Li, R. Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits. *Journal of Environmental Sciences*, 26(5), 955-961, 2014.
- (GCRF) MX-UK Integrative Think-Tank (ITT) on Environmental, "Global Challenges Research Fund (GCRF) MX-UK Integrative Think-Tank (ITT) on EnvironmentalResilience," [Acceso]: Mayo 2021.
- INEGI. Agua potable y drenaje. Recuperado últimos datos del 2015. <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- Visual Studio Code product. February 2023. Microsoft Privacy Statement. <https://code.visualstudio.com/>
- Veolia Aguascalientes. Fecha de consulta 15 de enero de 2023 [Solicitud de Servicios | Veolia Agua Aguascalientes](#).
- SMAPAC. Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Campeche. Fecha de consulta 15 de enero de 2023. [SMAPAC Campeche \(smapacampeche.gob.mx\)](#).
- AMD. Aguas del Municipio de Durango. Reportes. (s.f.). Fecha de consulta 15 enero de 2023. <http://www.amd.gob.mx/amd/servicios/reportes.html>
- CEAS | Portal Tabasco. (s. f.). Fecha de Consulta 15 de enero de 2023 <https://tabasco.gob.mx/ceas>.
- RETS. Registro Estatal de Trámites y Servicios. (s/f). <https://tramites.yucatan.gob.mx>. Recuperado el 15 de enero de 2023, de <https://tramites.yucatan.gob.mx/>.
- React.dev. Getting Started. (s/f). Reactjs.org. Recuperado el 2 de marzo de 2023, de <https://legacy.reactjs.org/>.
- StarUML. (s/f). Staruml.Io. Recuperado el 10 de enero de 2023, de <https://staruml.io/>.
- MongoDB: The developer data platform. (s/f). MongoDB. Recuperado el 10 de febrero de 2023, de <https://www.mongodb.com/>
- Node.js. (s/f). Node.js. Recuperado el 18 de abril de 2023, de <https://nodejs.org/en>
- Express - Infraestructura de aplicaciones web Node.js. (s/f). Expressjs.com. Recuperado el 18 de abril de 2023, de <https://expressjs.com/es/>
- Google Maps Platform. (s/f). Google Developers. Recuperado el 18 de abril de 2023, de <https://developers.google.com/maps?hl=es-419>

Desarrollo de la programación de una mano robótica que realiza gestos en la lengua de señas mexicanas

Naomi Vega Pérez*. Juan Pablo Gómez Nieto**

*Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, campus Cuitláhuac, CP. 94910
México (Tel: 2787322050; e-mail: 20193I101063@utcv.edu.mx).

** Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, campus Cuitláhuac, CP. 94910
México (Tel: 2787322050; e-mail: juan.gomez@utcv.edu.mx).

Resumen: Una persona de escucha activa llega a tener conflictos de comunicación con personas que padecen discapacidad auditiva, generalmente, las personas con esta discapacidad se comunican mediante una lengua de señas; herramienta que se ve limitada a un contexto regional y cultural, debido a que resuelve problemáticas de comunicación e integración particulares, tales como, el ambiente familiar, escolar, laboral o incluso recreativas, escenarios que no permiten disponer de una lengua de señas universal. En México, Boris Fridman Mintz en 2019 estima que los usuarios nativos de Lengua de Señas Mexicana pueden ser entre 49,000 y 195,000 personas, mientras que la Federación Mexicana de Sordos estima esa población en 300,000 personas. Con base en el panorama expuesto, el presente artículo expone el desarrollo de la programación de una mano robótica que represente los gestos de la Lengua de Señas Mexicana correspondientes a una palabra y/o una oración recibida por una aplicación móvil para establecer la comunicación entre una persona de escucha activa y un discapacitado auditivo, así, se dispone de una interfaz de comunicación efectiva entre las personas mencionadas y así facilitar la inclusión social de las personas que padecen este tipo de discapacidades, entre otras bondades que tiene el sistema desarrollado.

Palabras clave: Lengua de señas mexicanas, Discapacitados auditivos, Interfaz de comunicación para sordos, Programación, Mano robótica.

1. INTRODUCCIÓN

Las Tecnologías de la Información (TI) abren un campo de posibilidades en las actividades profesionales, sociales y personales, su amplio campo de aplicación permite incluir a las personas con discapacidad que poseen alguna limitación en la percepción auditiva o visual, motricidad o intelectuales (M. Azorín, Ceres, Frizera, & Freire Bastos, 2013). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), al comienzo del siglo XXI existían casi 55 millones de personas con distintos tipos de discapacidad viviendo en Iberoamérica. Además, el número de personas con discapacidad está creciendo debido al envejecimiento de la población y al incremento global de los problemas crónicos de salud. Un caso particular son las personas con discapacidad auditiva; sus limitantes impactan al grado de tener conflictos de comunicación con personas de escucha activa, sobre todo en el manejo de un lenguaje de señas (M. Azorín, Ceres, Frizera & Freire Bastos, 2013).

No existen cifras oficiales sobre el número de personas que usan una lengua de señas particular; en México, la más reciente es ofrecida por Boris Fridman Mintz en 2019, quien propone que los usuarios nativos de Lengua de Señas Mexicana pueden ser entre 49,000 y 195,000 personas.

En el área de las TI se desarrollan diferentes tipos de interfaces adaptadas o dispositivos alternativos de interacción entre la

persona y los sistemas de cómputo o incluso nuevas formas de diálogo entre personas sin discapacidad y con alguna discapacidad auditiva. Es así como se generan líneas de investigación que desarrollan herramientas tecnológicas que eliminan las barreras mencionadas, como lo es el desarrollo de una mano robótica que realiza gestos en la lengua de señas mexicanas

2. PROGRAMACIÓN DE APP

Este artículo reporta la etapa de programación del firmware del microcontrolador empleado para realizar los movimientos necesarios por la mano robótica que representa los gestos en la lengua de señas mexicanas. Su desarrollo implicó el uso del software MIT App Inventor®; como primer punto, se realizó la interfaz de la aplicación, posteriormente la programación a bloques de esta misma para su adecuado funcionamiento como se puede apreciar en la figura 1.

Algunas características del diseño de la aplicación se describen a continuación: tiene un botón para conectar el dispositivo bluetooth en el cual nos manda un listado de dispositivos que se encuentran, contiene una etiqueta que muestra el estado del dispositivo; es decir, si está conectado o en su caso desconectado. También un botón para desconectar el dispositivo, tiene un contenedor para introducir el mensaje que

se quiere enviar, así mismo contiene un botón de enviar para que el texto se envíe y un botón de borrar que sería para eliminar lo que se escribió o el mensaje.



Fig. 1. Elaboración de la aplicación.

3. PROGRAMACIÓN DEL FIRMWARE

Para programar los gestos en la lengua de señas mexicanas se identificaron los movimientos y posiciones de los elementos de la mano robótica requeridas para cada una de las letras; el firmware que radica en el microcontrolador se desarrolló de tal modo que a través de patrones identificados y funciones, hace posible coordinar a un grupo de servo motores que mueven a la mano robótica para hacer los gestos que corresponden a las letras del abecedario, que tras una secuencia de estas muestran palabras y con estas oraciones comprendidas por el discapacitado auditivo.

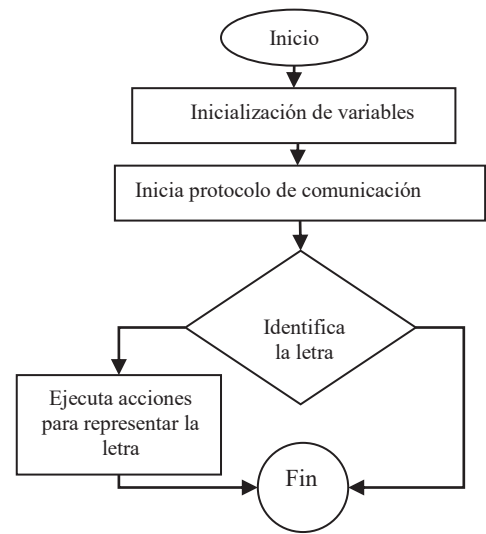


Fig. 2. Diagrama de flujo del programa realizado para el sistema.

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 2, se usa para representar de forma gráfica el programa desarrollado para la mano robótica y poder ejecutar una acción el microcontrolador, dispositivo que regula las posiciones de los dedos a través de la inicialización de las variables que se tienen declaradas. Empleando el protocolo de comunicación bluetooth, se manda

el comando correspondiente a la letra a representar, esta se identifica y se realizan las acciones para representarla en el hardware implementado.

La mano robótica demanda movimientos de los servomotores para la representación de cada letra en la Lengua de Señas Mexicana, proceso que a través de la modulación por ancho de pulso fue posible. Los desplazamientos de los actuadores en ángulos exactos en grados centesimales, fue determinante para coordinar el movimiento de los dedos de la mano robótica, tal como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplos de los desplazamientos en grados de los servomotores para representación de las letras en el LSM.

Letra	Servomotor 1	Servomotor 2	Servomotor 3	Servomotor 4	Servomotor 5
A	180°	20.6°	0°	2.2°	180°
N	11.9°	55.8°	54.9°	0°	180°
Z	109°	180°	21.9°	5°	47.1°

Las primeras pruebas se realizaron con tiempos de 600 ms, produciendo representaciones erróneas de las letras en el LSM. Tras los ajustes mecánicos pertinentes, observaciones y pruebas, se definió que el tiempo de operación adecuado es de 1 segundo, así se generan los movimientos exactos y reproducibles de la mano robótica para representar de los gestos por la extremidad mecatrónica.

4. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se desarrolló una mano robótica con la capacidad de emitir los gestos por una mano robótica del LSM desde un dispositivo móvil de manera eficiente a través de la correcta programación del hardware que ejecuta la acción descrita. La representación de cada letra, implica el análisis de la velocidad de operación de la mano robótica y su coordinación con la base de tiempo empleada en el desplazamiento de los dedos controlados por los servomotores, brindando la posibilidad de realizar una serie amplia de letras y palabras de una lengua de señas para discapacitados auditivos. Por lo anterior es posible argumentar que se dispone de una herramienta útil y eficiente para la comunicación de personas con la discapacidad mencionada y una persona de escucha activa.

REFERENCIAS

Acevedo, G., Flores, R., Lima, S., & Alducin, B. (2008). iiis.org. Obtenido de iiis.org:
<http://www.iiis.org/CDs2008/CD2009CSC/CISC12009/PapersPdf/C828UG.pdf>

Carguacundo, M., & Constante, P. (2018). Traductor de texto y voz a lengua de señas ecuatoriana a través de un avatar implementado para dispositivos Android. Revista Infociencia, 20-25.

Castilla Acosta, K. M., Betanzos Martínez, O. E., Jerónimo Bañuelos, J., & Domínguez García, M. (2017). Sistema traductor de lenguaje de señas mexicanas. Revista de las Tecnologías de la Información, 55-62.

Representación del proceso de la anotación del segmento génico V con el modelo SADT

Juan Miguel, Javier Ortiz-Hernández, Yasmin Hernández,
Noemi Chavez-Serret.

Instituto Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, México, CP 62490
(e-mail: {m22ce046, javier.oh, yasmin.hp, d20ce065, m22ce051}@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Los segmentos V(D)J son cruciales para la producción de anticuerpos y la detección de elementos extraños en el cuerpo. La anotación de estos segmentos es en gran parte un proceso manual y repetitivo, aunque se han tenido avances en la sistematización, la gran mayoría de los trabajos se enfocan en la implementación de los modelos y la aplicación de algoritmos. Debido a lo anterior en este trabajo, se presenta una representación conceptual del proceso de anotación utilizando un modelo SADT.

Keywords: modelado conceptual, representación de procesos, genómica, segmentos V, modelado SADT

1. INTRODUCCIÓN

La anotación en genómica es importante para etiquetar secciones específicas del genoma, aunque la mayoría de los sistemas automatizados se centran en la resolución y anotación de genes (Olivieri & Gambón-Deza, 2019; Sirupurapu et al., 2022). Es necesario abordar este problema desde una perspectiva computacional para entenderlo mejor y optimizar procesos. Esto plantea la pregunta de por qué es importante abordar este problema desde una perspectiva computacional.

La anotación de genes utiliza herramientas de bioinformática para analizar y reconocer secciones en el genoma, lo que proporciona información para la anotación. Los resultados de las herramientas de bioinformática se usan para la anotación, y el experto clasifica cada resultado después de analizarlo. Uno de los principales inconvenientes en este proceso es que la mayoría es manual y con una alta repetitividad. La anotación genómica es crucial para estudiar la biología e inmunología de varias especies y para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades y trastornos genómicos (Sirupurapu et al., 2022).

Los segmentos V son cruciales para la producción de anticuerpos (Zaldívar Ochoa, 2002). Al modelar el proceso de anotación desde diferentes perspectivas, se puede comprender y conceptualizar mejor el proceso, lo que a su vez puede llevar a una sistematización y mejora del proceso. La cual puede ser realizada utilizando técnicas computacionales como aprendizaje automático o el desarrollo de un modelo inteligente para automatizar la identificación de las secuencias y agilizar el proceso de anotación. Pero todo partiendo desde la representación conceptual del proceso

El siguiente artículo presenta un enfoque computacional para la representación del proceso de anotación de los segmentos V. El abordaje del problema de la comprensión del proceso comienza con una revisión de la literatura para entender el estado actual de la anotación de los segmentos V. Luego, para extraer el conocimiento relevante de los expertos se hizo uso de un modelo SADT donde se muestran cada una de las etapas realizadas por los expertos para el proceso de anotación.

2. Revisión de la literatura

En esta sección, se busca identificar trabajos relacionados con el trabajo actual. La revisión se enfocó en responder tres preguntas principales: ¿cómo se ha abordado la sistematización del proceso de anotación de genes?, ¿cuáles son sus principales técnicas? y ¿en qué trabajos se ha abordado este tema? Los núcleos temáticos que se proponen para generar las cadenas de búsqueda se conforman por: a) alineamiento de secuencias para la anotación de genes y b) identificación de genes y funcionalidad en segmentos génicos.

Como resultado de los núcleos temáticos se generaron tres cadenas de búsqueda, las cuales consisten en: a) "coding" or "non-coding" and "automatic classification" and "gene" and "machine learning" and "antibody" b) "sequence alignment" and "gene segments" and "germline" and "machine learning" and "immunoglobulin" c) "automatic" and "machine learning" and "gene annotation" and "immunoglobulin" and "vertebrates"

La presente revisión se inició el día siete de septiembre y fue finalizada hasta el día 2 de febrero del presente año 2023, dando como resultado un total de 13 artículos por los dos núcleos temáticos. En la revisión se hizo uso de las bases de datos de PubMed, Springerlink y Science Direct; con el buscador Google académico. Se filtraron los artículos mediante cadenas de búsqueda, enfocándose en los trabajos relacionados con la biología y la informática. Se utilizó la lectura de títulos, resúmenes y conclusiones para establecer criterios de inclusión y exclusión. Luego se realizó una revisión completa para determinar la inclusión o exclusión de los artículos.

Con los criterios de inclusión exclusión de las diferentes fases se obtuvo que: a) con la delimitación del área de interés se obtuvo un total de 174 artículos, b) con la lectura del resumen y conclusiones dio como resultado 74 artículos que fueron relevantes y c) el último punto en la revisión dio un total de 12 artículos relevantes excluyendo 62 artículos. El primer núcleo temático obtuvo un total de cuatro trabajos (Chao et al., 2022; Chowdhury & Garai, 2017; Lemoine et al., 2021; Li, 2018). Las principales herramientas utilizadas en el

alineamiento de secuencias son Blast, Exonerate utilizando modelos de homología; y HMMER utilizando los Modelos ocultos de Markov, los cuales tienen la capacidad para adaptarse a la variación de los datos de entrenamiento.

El segundo núcleo temático dio un resultado de ocho trabajos (Amin et al., 2018; Arunkumar & Zielinski, 2021; Choudhary, 2017; Kalkatawi et al., 2019; Olivieri & Gambón-Deza, 2019; Orozco-Arias et al., 2019; Sirupurapu et al., 2022; Stiehler et al., 2020). Se identificó que en la literatura hay un enfoque importante en el uso de modelos de aprendizaje máquina para la identificación de genes, incluyendo modelos de aprendizaje profundo, memoria a corto plazo (LSTM), redes neuronales convolucionales y recurrentes, y la red de memoria bidireccional a largo plazo (BLSTM).

Una de las principales áreas de oportunidad identificada por la búsqueda sistemática es la formalización computacional a partir de modelos. Una gran mayoría de los trabajos muestran un

resultado directo del desarrollo y reducen la explicación de la formalización con modelos computacionales.

3. El proceso de anotación desde un punto de vista computacional

La anotación de genes implica indicar el inicio y fin de un gen junto con su funcionalidad, y en la anotación de segmentos V se usan herramientas para identificar genes que emplean secuencias de referencia y herramientas como Blast, Exonerate y Hmmer. Las herramientas generan alineamientos heurísticos buscando secciones similares a las secuencias de referencia, lo que implica una aproximación a la realidad del segmento génico V.

Cada uno de los resultados son utilizados en visualizadores especializados para el análisis del genoma en donde se procede a realizar la anotación de los genes a partir de los conocimientos y reglas del experto. La Ilustración 1 muestra los diferentes procesos realizados para la anotación del genoma con la técnica de análisis y diseño estructurado (SATD).

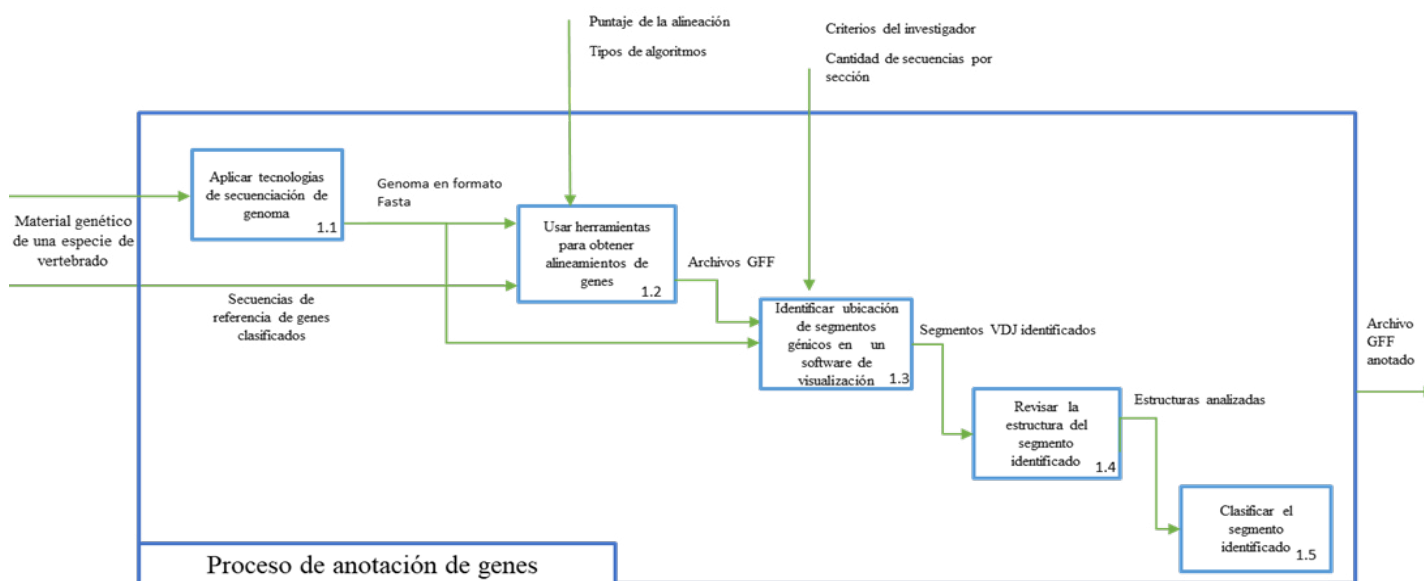


Ilustración 1 diagrama SATD del proceso de anotación

La primera actividad 1.1 que deben realizar los especialistas consiste en obtener la secuencia de ácido desoxirribonucleico (ADN) de un individuo. La secuencia completa del individuo se le conoce como genoma (García Simón, 2018). La actividad 1.2 consiste en el uso de sistemas especializados para buscar secuencias similares a una referencia mediante el alineamiento de secuencias. (García Simón, 2018; Universidad de Gent, 2015). En la actividad 1.3 se usa un visualizador para identificar alineamientos, determinar el inicio y fin de los segmentos génicos e interactuar con el genoma. La dificultad es determinar el inicio y fin debido a que los resultados son heurísticos y se requiere que el experto determine la estructura de cada subparte del segmento V.

La actividad 1.4 implica analizar la estructura de los segmentos identificados para determinar su funcionalidad y revisar sus componentes. Por ejemplo, en el segmento V se

analizarían las partes que lo conforman. El segmento V consta de 3 partes: el péptido señal, el exón y la señal de recombinación. Además, se debe considerar la dirección del segmento indicada por 5 y 3 prima. Cada parte del gen es etiquetada después de identificar el inicio y fin. La Ilustración 2 muestra las diferentes partes

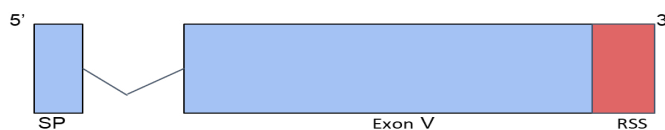


Ilustración 2 estructura del segmento génico V

La actividad 1.5 clasifica lo identificado en funcional o no funcional según las reglas específicas de cada segmento génico. Esto se divide en dos categorías funcional y no funcional,

cada categoría debe cumplir con ciertas reglas estas reglas son: un gen es funcional si cumple con las tres partes y no tiene un codón de paro, mientras que es no funcional si tiene un codón de paro o falta alguna de las subpartes del gen.

Se propone abordar los puntos 1.3, 1.4 y 1.5 del diagrama SADT mediante la sistematización de las actividades mediante un modelo de inteligencia artificial. La Ilustración 3 muestra las entradas necesarias y la aplicación del sistema basado en inteligencia artificial.

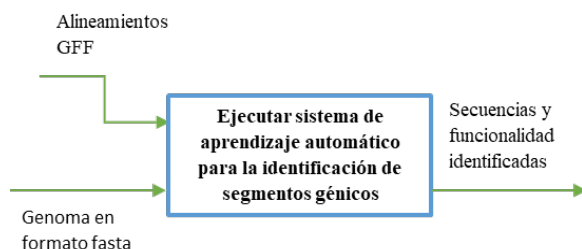


Ilustración 3 estructura del segmento génico V

La principal propuesta para automatizar el proceso consiste en el uso de los resultados de las herramientas en el formato general de Característica (GFF) para identificar posiciones de los segmentos génicos V. Una de las principales complicaciones para sistematizar el proceso es el uso de los archivos GFF por su estructura y la naturaleza que representa una aproximación a la realidad. Por ende, el trabajo a futuro será la interpretabilidad de los datos y cómo estos pueden representar verdaderamente los genes V

4. CONCLUSIONES

La anotación de los segmentos génicos V es un proceso complejo y extenso que requiere estructuración en múltiples pasos e integración de diversas fuentes de datos. La longitud de los segmentos y su alta repetitividad en el genoma aumentan la dificultad del proceso. No obstante, se ha demostrado mediante la revisión de la literatura que es posible mejorar el proceso gracias al uso de teoría de grafos o alineamiento de secuencias. Existe un sólido antecedente que puede ser mejorado e implementado en especies particulares.

La representación del proceso a partir de modelos computacionales es una tarea primordial. La razón de necesidad surge de la pregunta ¿Cómo se deben representar el proceso de anotación en conjunto de sus reglas? Cada una de las reglas que utilizan los expertos es necesario su representación con modelos computacionales para que puedan ser extrapoladas como reglas de decisiones o conjuntos de datos.

Como trabajo a futuro se continuará con la representación de las reglas biológicas en conjuntos de datos validados por expertos del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) en el Centro de investigación sobre Enfermedades Infecciosas (CISEI). El conjunto de datos debe ser validado por los expertos para iniciar con los análisis exploratorios, el

procesamiento de datos y la selección del mejor enfoque de aprendizaje máquina para la resolución del problema.

REFERENCIAS

- Amin, M. R., Yurovsky, A., Tian, Y., & Skiena, S. (2018). Deepannotator: genome annotation with deep learning. *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Bioinformatics, Computational Biology, and Health Informatics*, 254–259.
- Arunkumar, M., & Zielinski, C. E. (2021). T-Cell Receptor Repertoire Analysis with Computational Tools—An Immunologist’s Perspective. *Cells*, 10(12), 3582.
- Chao, J., Tang, F., & Xu, L. (2022). Developments in Algorithms for Sequence Alignment: A Review. *Biomolecules*, 12(4), 546.
- Choudhary, S. (2017). *Predicting protein coding boundaries using RNNs*.
- Chowdhury, B., & Garai, G. (2017). A review on multiple sequence alignment from the perspective of genetic algorithm. *Genomics*, 109(5–6), 419–431.
- Kalkatawi, M., Magana-Mora, A., Jankovic, B., & Bajic, V. B. (2019). DeepGSR: an optimized deep-learning structure for the recognition of genomic signals and regions. *Bioinformatics*, 35(7), 1125–1132.
- Lemoine, F., Blassel, L., Voznica, J., & Gascuel, O. (2021). COVID-Align: Accurate online alignment of hCoV-19 genomes using a profile HMM. *Bioinformatics*, 37(12), 1761–1762.
- Li, H. (2018). Minimap2: pairwise alignment for nucleotide sequences. *Bioinformatics*, 34(18), 3094–3100.
- Olivieri, D. N., & Gambón-Deza, F. (2019). Iterative Variable Gene Discovery from Whole Genome Sequencing with a Bootstrapped Multiresolution Algorithm. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2019, 3780245. <https://doi.org/10.1155/2019/3780245>
- Orozco-Arias, S., Isaza, G., & Guyot, R. (2019). Retrotransposons in plant genomes: structure, identification, and classification through bioinformatics and machine learning. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(15), 3837.
- Sirupurapu, V., Safonova, Y., & Pevzner, P. A. (2022). Gene prediction in the immunoglobulin loci. *Genome Research*, 32(6), 1152–1169.
- Stiehler, F., Steinborn, M., Scholz, S., Dey, D., Weber, A. P. M., & Denton, A. K. (2020). Helixer: cross-species gene annotation of large eukaryotic genomes using deep learning. *Bioinformatics*, 36(22–23), 5291–5298.
- Zaldívar Ochoa, M. (2002). El sistema inmunológico de las mucosas. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 18(5), 352–354.

Clasificación de la Pose del Cuerpo Humano a Través de Puntos Característicos

Luis Paul Arriaga Santos*, Raúl Pinto Elías*

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México
{m21ce058, raul.pe}@cenidet.tecnm.mx).*

Resumen: La estimación de la pose humana brinda una rama de exploración distinta a las utilizadas para el reconocimiento de actividades humanas (HAR, por sus siglas en inglés), los enfoques principalmente utilizados son basados en el uso de sensores con placas de desarrollo, dispositivos inteligentes o a través del procesamiento de imágenes. En este artículo se propone la implementación de un modelo de estimación de la pose y un modelo de clasificación que sean capaces de localizar y clasificar un conjunto de poses humanas a través de puntos característicos del cuerpo humano. La experimentación se realizó en dos conjuntos de datos para la etapa de clasificación, uno de origen propio, así como un conjunto de datos reportado en la literatura; de igual manera se realizó una comparativa con los algoritmos de *random forest*, *logistic regression*, *ridge classifier* y *gradient boosting classifier* y se evaluaron utilizando las métricas de exactitud, precisión y sensibilidad. Los resultados muestran que el algoritmo con mejor exactitud fue *random forest* con una puntuación de 99% en el conjunto de datos propios y de 98% con respecto al conjunto de datos reportado en la literatura.

Palabras clave: Reconocimiento de actividades, estimación de la pose humana, aprendizaje automático.

1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento de actividades humanas es un campo de estudio dentro de la inteligencia artificial y ciencias computacionales que se enfoca en identificar y clasificar diversas actividades humanas. HAR típicamente involucra el uso de sensores y algoritmos para identificar patrones en el comportamiento humano.

HAR es usado en una gran variedad de aplicaciones, tales como, cuidado de la salud, sistemas de monitoreo de seguridad, análisis de comportamiento de individuos.

Los enfoques utilizados en HAR, varían según su aplicación propia de cada sistema, sin embargo, es común el uso de sensores como giroscopios, acelerómetros y magnetómetro, los cuales son incorporados a través de placas de desarrollo o dispositivos inteligentes, esto implica una compleja caracterización de los sensores para disminuir posibles perturbaciones causadas por ruido en el ambiente. Otro enfoque es el basado en el procesamiento de imágenes, ya sea la imagen completa o a través de la extracción de un sub conjunto de puntos característicos a partir de la estimación de la pose humana.

La estimación de la pose humana es igualmente un área bastante activa dentro de la visión por computadora, la cual brinda grandes ventajas sobre otros enfoques utilizados para el

reconocimiento de actividades, como lo son la invariabilidad con respecto a rotaciones, cambios de iluminación y perspectivas.

Considerando lo mencionado, este trabajo toma la clasificación de la pose humana a través de un conjunto de puntos característicos, así como la codificación de estos a través de medidas entre los puntos para implementar algoritmos de aprendizaje automático para la clasificación de la pose.

La principal aportación de este artículo se encuentra en la evaluación de modelos de aprendizaje automático para la clasificación de la pose, así como un nuevo conjunto de datos¹ para la clasificación de la pose humana a través de puntos característicos.

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección dos se presentan los trabajos relacionados, en la sección tres se analizan los fundamentos teóricos de la investigación, en la sección cuatro se describe el modelo propuesto, en la sección cinco se habla de la experimentación y resultados y por último se presenta la sección de conclusiones y agradecimientos.

¹ https://drive.google.com/drive/folders/1ciDutoMRdRjv9jaytXIOphJGMp5t2NI4?usp=share_link

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En el campo del reconocimiento de actividades humanas varios trabajos de investigación han sido presentados a través de diferentes métodos y problemáticas específicas para el reconocimiento de las actividades.

En (Ghosh et al., 2020) se trabaja con el uso de dispositivos inteligentes para el reconocimiento de actividades a través del procesamiento de datos inerciales con algoritmos de aprendizaje automático.

En un estudio (Shinde et al., 2018) se hace uso de cámaras con la finalidad de identificar la actividad estática por medio del procesamiento completo de la imagen con el uso de redes neuronales convolucionales y aprendizaje profundo con YOLO, mientras que Kellokumpu et al. (2005) realiza la sustracción del fondo con la finalidad de segmentar la imagen y utilizar la segmentación de la persona como un descriptor invariante para utilizarlo con máquinas de vector soporte y así determinar la pose de la persona.

Yadav et al. (2021) trabaja en conjunto con ambos dispositivos, en un sistema denominado multimodal usando tanto el procesamiento en cámaras como con los dispositivos inteligentes, de la misma manera en (Ehatisham-UI-Haq et al., 2019) se detalla un sistema multimodal que utiliza información de diversos sensores, como lo son cámaras RGB, sensores de profundidad y sensores inerciales vestibles. Así mismo reporta un mejor resultado en la integración de estos para la clasificación de las actividades.

Nadeem et al. (2020) trabaja con el reconocimiento de las actividades basado en la detección de partes del cuerpo a partir de la segmentación del fondo y localización de puntos característicos básicos. Kilbas et al. (2022) trabaja únicamente con un conjunto de puntos característicos para calcular las distancias entre estos, y así entrenar un modelo basado en redes neuronales para la clasificación de 36 poses.

3. MARCO TEÓRICO

El reconocimiento de actividades humanas puede descomponerse en etapas para su cumplimiento y la estimación de la pose humana corresponde a la detección únicamente de actividades estáticas o dinámicas según el enfoque que se aborde por lo que en esta sección se menciona los principales componentes para el desarrollo y validación del modelo para la clasificación.

3.1 Estimación de la pose

La estimación de la pose humana es un problema de predicción de puntos característicos del cuerpo de una persona en una imagen, estos puntos característicos son asociados a articulaciones del cuerpo, tales como hombros, rodillas, muñecas y más, sin embargo, también se asocian a puntos relativos capaces de influenciar en la localización de dichas articulaciones (Dang et al., 2019).

Existen dos paradigmas principales para la estimación de la pose: *Top-down* y *Bottom-up*. El paradigma *top-down* localiza primero a la persona y posteriormente ejecuta la localización de los puntos característicos, mientras que el enfoque *bottom-up* localiza primero todos los puntos característicos visibles en la imagen y posteriormente los agrupa en individuos. El paradigma *top-down* es más exacto, pero más costoso computacionalmente (Geng et al., 2021).

En la literatura existen varios modelos de estimación de la pose entre ellos:

- *BlazePose*,
- *OpenPose*,
- *YoloPose*
- *HRNet*,

Considerando estos modelos se realizó un estudio breve para identificar qué modelo de estimación de la pose utilizar para extraer los puntos característicos.

En la literatura Mroz et al. (2021) hace una comparativa de calidad entre *BlazePose* y *OpenPose* en un entorno clínico, *OpenPose* es considerablemente mejor en la estimación de la pose por cuadro, sin embargo, debido a que *OpenPose*, así como *YoloPose* y *HRNet* realizan la estimación de la pose en cada cuadro de video (Bazarevsky & Grishchenko, 2020a; Cao et al., 2017; Debapriya M et al., 2022), como a diferencia de *BlazePose*, el cual únicamente lo realiza una vez y a partir de eso realiza un seguimiento de los puntos característicos hasta que la confianza de estos baje y en dado caso vuelve a realizar la localización de los puntos.

OpenPose, *YoloPose* y *HRNet* muestran oscilaciones constantes entre la ubicación de los puntos característicos, y su tiempo de ejecución es mayor en comparación al del *BlazePose*, el cual es un modelo capaz de ejecutarse en tiempo real, inclusive en dispositivos móviles (Bazarevsky & Grishchenko, 2020b).

Los resultados reportados en la literatura de estos modelos en el conjunto de dato COCO se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Validación de modelos en conjunto de datos COCO

Arquitectura	Resolución imagen	AP	AP50	AP75	AR
<i>Pose_HRNET_W32</i>	256x192	74.6	90.4	81.9	79.9
<i>OpenPose</i>	-	60.5	83.4	66.4	66.5
<i>YoloPose</i>	960P	69.4	90.2	76.1	75.9

La tabla 1 muestra el promedio de la precisión considerando la métrica planteada en COCO para las tres arquitecturas presentes, sin embargo, no hay comparativa directa con respecto al modelo

de BlazePose debido a la diferencia con respecto al número de puntos característicos y su distribución de estos.

3.2 Clasificación de la pose

La clasificación de la pose humana se realizó a través de cuatro algoritmos de aprendizaje automático, dos basados en regresión y dos en árboles de decisión, estos se describen brevemente a continuación.

Random Forest

Random forest es un algoritmo de aprendizaje automático usado para la clasificación y regresión. Es una técnica de aprendizaje ensamblado que combina múltiples árboles de decisión para realizar predicciones. Detalles sobre el algoritmo pueden ser revisados con (Breiman, 2001).

Linear Regression

Linear Regression es un algoritmo de aprendizaje automático utilizado para la clasificación de variables categóricas o binarias. A diferencia de la regresión lineal, la regresión logística se utiliza para predecir la probabilidad de que una observación pertenezca a una de las clases posibles. Detalles sobre el algoritmo pueden ser revisados con (Sabouri et al., 2020).

Ridge Classifier

Ridge Classifier es un algoritmo de clasificación lineal utilizado en aprendizaje automático. Es una variante del algoritmo de regresión lineal que utiliza una técnica de regularización para evitar el sobreajuste en modelos lineales. Detalles sobre el algoritmo pueden ser revisados en (Deepa et al., 2021).

Gradient Boosting Classifier

Gradient Boosting Classifier es un algoritmo de aprendizaje automático utilizado en problemas de clasificación. Es un tipo de algoritmo de ensamblado que combina múltiples modelos más simples, en este caso árboles de decisión, para crear un modelo de clasificación más preciso y robusto. Detalles sobre el algoritmo pueden ser revisados en (Alshari et al., 2021).

3.3 métricas

Para evaluar el desempeño de los modelos de clasificación se han utilizado tres métricas principales para el desarrollo de modelos basados en aprendizaje supervisado, como es el caso de este proyecto. las métricas son: exactitud, precisión y sensibilidad, dichas métricas utilizan la matriz de confusión como la que se muestra en la tabla 1 como base para su cálculo, donde la matriz de confusión es una representación visual tabular de las predicciones del modelo contra los valores reales de las etiquetas. Cada columna de la matriz de confusión representa las instancias de una clase predicha, mientras que cada fila

representa las instancias de la clase real u observación (Bharadwaj et al., 2021).

Exactitud:

$$\frac{VP + VN}{(VP + FP + FN + VN)} \quad (1)$$

Precisión:

$$\frac{VP}{(VP + FP)} \quad (2)$$

Sensibilidad:

$$\frac{VP}{(VP + FN)} \quad (3)$$

Tabla 2. Matriz de confusión

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	Verdaderos Positivos (VP)	Falsos Negativos (FN)
	Negativos	Falsos Positivos (FP)	Verdaderos Negativos (VN)

3.3 Distancia Manhattan

La distancia manhattan es utilizada en este trabajo para calcular la distancia entre pares de puntos característicos como se muestra en la Fig. 1. esta distancia se calcula utilizando las coordenadas cartesianas de los puntos clave con respecto a (x,y) con la finalidad de obtener una caracterización de los puntos clave que sea invariante a rotaciones y traslaciones.

Distancia Manhattan:

$$|A - B| = \sum_{i=1}^d |a_i - b_i| \quad (4)$$

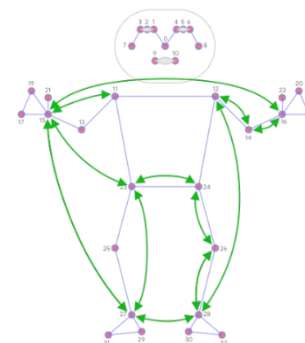


Fig. 1. distancias calculadas entre puntos característicos

4. SISTEMA PROPUESTO

El sistema implementado consiste en tres etapas principales, las cuales se muestran en la Fig. 2.

Para el desarrollo del sistema se realizó una comparativa entre los modelos de estimación de la pose disponibles en la literatura, los cuales se ajustarán mejor a los requisitos del sistema a construir.

Para la etapa de clasificación se tomó el conjunto de par de coordenadas dadas por el modelo de estimación de la pose para calcular las distancias como se muestra en la figura 2, de tal manera que se codificara el par de coordenadas en distancias, las cuales se pasan como entrada para los cuatro modelos basados en aprendizaje automático y así determinar posteriormente cuáles brindan mejor exactitud para la clasificación de la pose.

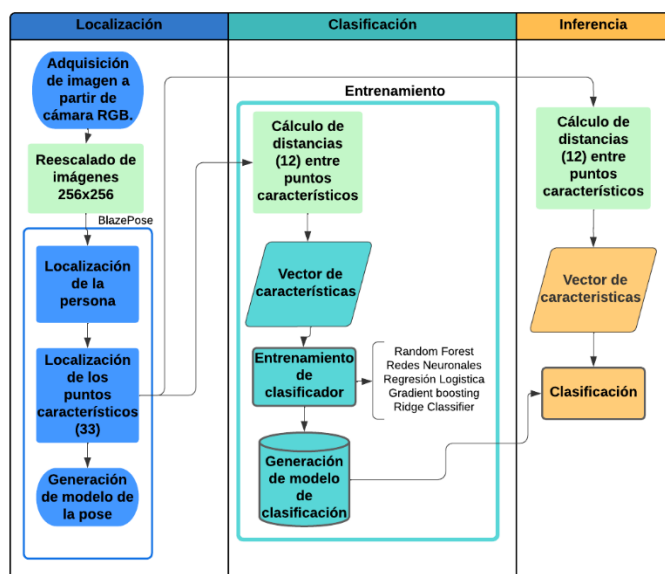


Fig. 2. Metodología propuesta para el desarrollo del sistema

4.1 Localización

Para la selección del modelo de localización se consideró una revisión del estado del arte en la sección 3.1 con la finalidad de comparar los modelos disponibles, así como identificar cuál usar para la implementación en el sistema.

El modelo seleccionado (*BlazePose*) localiza a las personas dentro de la imagen y posteriormente realiza la localización de los puntos característicos, siguiendo así un enfoque *top-down*. Finalmente realiza el modelo de la pose humana y pasa el conjunto de puntos característicos a las etapas de clasificación e inferencia.

4.2 Clasificación

La clasificación de los puntos característicos en poses se lleva a través de cuatro modelos de aprendizaje automático, *random forest*, *logistic regresion*, *ridge classifier*, *gradient boosting*

classifier, estos reciben como datos de entrada el conjunto de par de coordenadas dado por *BlazePose* y se pasan a través de una etapa de preprocesamiento para el cálculo de distancias entre los puntos característicos con el objetivo de hacer invariante a rotaciones y translaciones al modelo y no depender así de una posición absoluta dada por las coordenadas de los puntos característicos.

Una vez entrenado los modelos de clasificación se determinó cuál tenía mejor rendimiento para la integración final al sistema completo por medio de la generación del modelo.

4.3 Inferencia

En la etapa de inferencia se retoma el modelo entrenado con los mejores resultados de la etapa de clasificación, así como la localización de los puntos característicos dados por el modelo de *BlazePose* para calcular la distancia entre los 12 puntos característicos seleccionados, y así poder realizar la clasificación de las poses en videos nuevos.

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

5.1 Experimentación para etapa de clasificación

Los experimentos realizados en la etapa de clasificación con respecto ambos conjuntos de datos son con la finalidad de entrenar los modelos de aprendizaje automático y determinar cuál de ellos tiene mejor rendimiento para la integración al sistema.

Conjunto de datos propio

El conjunto de datos propio está constituido por un total de 4,589 ejemplos descritos por 33 puntos clave en 4 variables (*X*, *Y*, *Z* y *Visibilidad*) por cada punto clave y su respectiva clase, los datos se encuentran divididos en 3,212 datos para entrenamiento y 1,377 para prueba/validación.

En la Fig.3. se muestran dos ejemplos de lo que son las clases que constituyen el conjunto de datos propio, así como los puntos característicos.

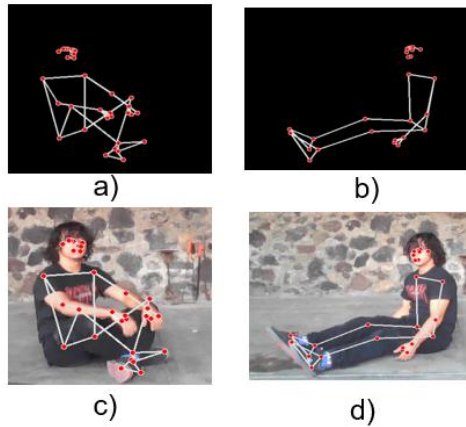


Fig. 3. a) y b) corresponden a la representación del modelo de la pose respectivamente, mientras que, c) y d) corresponde a la imagen junto con la estimación de su pose.

Para demostrar el rendimiento de los modelos en el conjunto de datos propio se presenta la tabla 3, donde se muestra la comparativa de entre los modelos de clasificación con respecto a cada métrica y modelo implementado.

Tabla 3. Resultados con conjunto de datos propio

	<i>Logistic Regression</i>	<i>Ridge Classifier</i>	<i>Random forest Classifier</i>	<i>Gradient Boosting Classifier</i>
Exactitud	0.9957	0.9958	0.9971	0.9957
Precisión	0.9958	0.9889	0.9972	0.9930
Sensibilidad	0.9957	0.9887	0.9971	0.9929

En los resultados comparativos de la tabla 3 se muestra que los cuatro modelos tuvieron resultados altos, mostrando la efectividad para clasificar las diferentes poses. El mejor modelo fue *random forest*.

De igual manera se calculó la matriz de confusión que se muestra en la Fig. 4 con respecto al conjunto de datos propio y solo con respecto al modelo con mejor rendimiento, para el cual en este caso fue con el algoritmo de *random forest*.

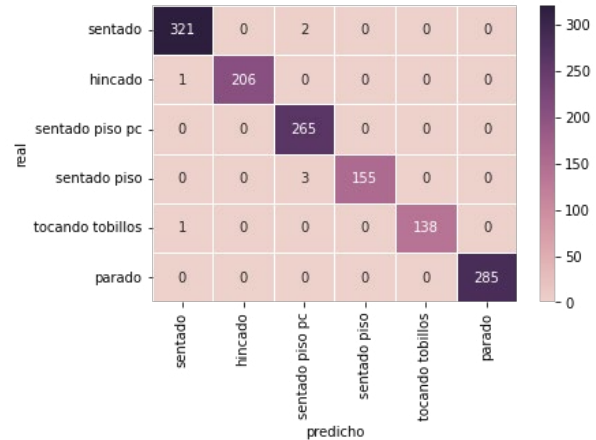


Fig. 4. Matriz de confusión con random forest y conjunto de datos propios

En la Fig.4 se observa que el modelo solo muestra confusión con respecto a un ejemplo de la clase hincado y sentado, lo cual se puede deber a dos factores, un dato atípico por una mala anotación o la cercanía entre estas dos clases como lo es en el caso de la clase sentado en piso y sentado en piso con piernas cruzadas.

Conjunto de datos de la literatura

De la literatura se ha tomado el conjunto de datos propuesto por (Kilbas et al., 2022); el cual está constituido por 36 clases divididas entre 21,796 ejemplos descritos por 22 puntos clave y a su vez por 3 variables cada uno (*X*, *Y* y *P*).

Para demostrar el rendimiento de los modelos en el conjunto de datos de la literatura se presenta la tabla 4 donde se muestra la comparativa de cada modelo y las métricas de evaluación. De igual manera se realizó la matriz de confusión con el algoritmo de *random forest* que se muestra en la Fig. 5.

Tabla 4. Resultados con conjunto de datos de la literatura

	<i>Logistic Regression</i>	<i>Ridge Classifier</i>	<i>Random forest Classifier</i>	<i>Gradient Boosting Classifier</i>
Exactitud	0.9475	0.7805	0.9819	0.9721
Precisión	0.9476	0.6978	0.9820	0.9730
Sensibilidad	0.9475	0.7805	0.9819	0.9721

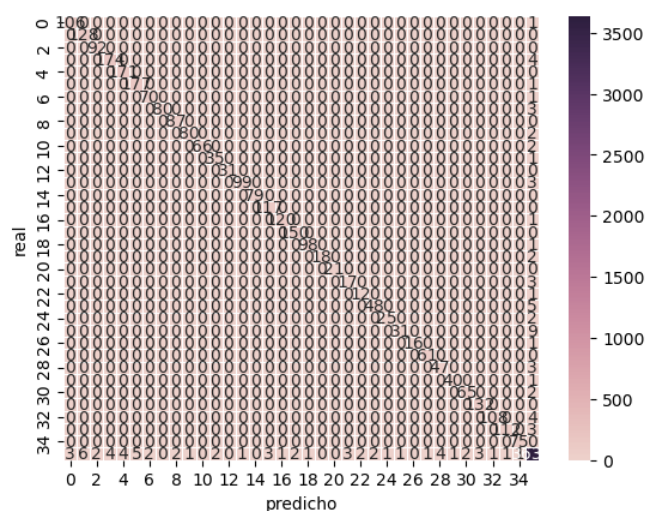


Fig. 5. Matriz de confusión con random forest y conjunto de datos de (Kilbas et al., 2022)

Los resultados obtenidos en este conjunto de datos muestran que los modelos de aprendizaje automático implementados no sufren una pérdida de manera general en el rendimiento con el aumento de clases, sin embargo, hay una presencia de errores con respecto a la clase 36, la cual está asociada a la clase de poses intermedias, lo cual genera una clase con ejemplos bastante cercanos a otras clases en una sola clase. De igual manera esta clase representa un desbalance considerable en este conjunto de datos, debido a que representa casi la mitad de los datos totales del conjunto de datos.

6. CONCLUSIÓN

Este presente artículo propone un sistema de visión artificial que clasifique un conjunto de poses a partir de puntos característicos del cuerpo dados por un modelo de estimación de la pose. Los resultados experimentales indican que el mejor modelo para la clasificación de la pose es *random forest* con una exactitud de 98% y 99% en los conjuntos de datos. De igual manera los resultados obtenidos muestran que el sistema puede ampliarse a un mayor número de poses con la finalidad de desarrollar aplicaciones más específicas sin comprometer la pérdida de exactitud. Como trabajos futuros se plantea la integración de esta metodología de clasificación de las poses a sistemas de reconocimiento de actividades humanas.

7. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca y apoyo otorgado para desarrollar esta investigación en el TecNM/CENIDET

REFERENCIAS

- Alshari, H. H., Saleh, A. Y., & Odabaş, A. (2021). Comparison of Gradient Boosting Decision Tree Algorithms for CPU Performance. *Journal of Institute Of Science and Technology*, 37(1).
- Bazarevsky, V., & Grishchenko, I. (2020a). *Google AI Blog: On-device, Real-time Body Pose Tracking with MediaPipe BlazePose*. Google AI Blog.
- Bazarevsky, V., & Grishchenko, I. (2020b). *Google AI Blog: On-device, Real-time Body Pose Tracking with MediaPipe BlazePose*. Google AI Blog.
- Bharadwaj, Prakash, K. B., & Kanagachidambaresan, G. R. (2021). Pattern Recognition and Machine Learning. In *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57077-4_11
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Cao, Z., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2017). Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-January*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.143>
- Dang, Q., Yin, J., Wang, B., & Zheng, W. (2019). Deep learning based 2D human pose estimation: A survey. *Tsinghua Science and Technology*, 24(6). <https://doi.org/10.26599/TST.2018.9010100>
- Debapriya M, Soyeb N, & Manu M. (2022). YOLO-Pose - Enhancing YOLO for Multi Person Pose Estimation Using Object Keypoint Similarity Loss. *DeepAI*.
- Deepa, N., Prabadevi, B., Maddikunta, P. K., Gadekallu, T. R., Baker, T., Khan, M. A., & Tariq, U. (2021). An AI-based intelligent system for healthcare analysis using Ridge-Adaline Stochastic Gradient Descent Classifier. *Journal of Supercomputing*, 77(2). <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03347-2>
- Ehatisham-Ul-Haq, M., Javed, A., Azam, M. A., Malik, H. M. A., Irtaza, A., Lee, I. H., & Mahmood, M. T. (2019). Robust Human Activity Recognition Using Multimodal Feature-Level Fusion. *IEEE Access*, 7. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913393>
- Geng, Z., Sun, K., Xiao, B., Zhang, Z., & Wang, J. (2021). Bottom-up human pose estimation via disentangled keypoint regression. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01444>
- Ghosh, N. S., Majumdar, R., Giri, B., & Ghosh, A. (2020). Detection of Human Activity by Widget. *ICRITO 2020 - IEEE 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)*. <https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9197982>
- Kellokumpu, V., Pietikäinen, M., & Heikkilä, J. (2005). Human activity recognition using sequences of postures. *Proceedings of the 9th IAPR Conference on Machine Vision Applications, MVA 2005*.

- Kilbas, I., Gribanov, D., & Paringer, R. (2022). A neural network based algorithm for classification of sets of human body keypoints. *2022 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2022*.
<https://doi.org/10.1109/ITNT55410.2022.9848751>
- Mroz, S., Baddour, N., McGuirk, C., Juneau, P., Tu, A., Cheung, K., & Lemaire, E. (2021). Comparing the Quality of Human Pose Estimation with BlazePose or OpenPose. *BioSMART 2021 - Proceedings: 4th International Conference on Bio-Engineering for Smart Technologies*.
<https://doi.org/10.1109/BioSMART54244.2021.9677850>
- Nadeem, A., Jalal, A., & Kim, K. (2020). Human Actions Tracking and Recognition Based on Body Parts Detection via Artificial Neural Network. *3rd International Conference on Advancements in Computational Sciences, ICACS 2020*.
<https://doi.org/10.1109/ICACS47775.2020.9055951>
- Sabouri, S., Hajrasouliha, A., Song, Y., & Greene, W. H. (2020). Logistic regression. In *Basic Quantitative Research Methods for Urban Planners*.
<https://doi.org/10.4324/9780429325021-13>
- Shinde, S., Kothari, A., & Gupta, V. (2018). YOLO based Human Action Recognition and Localization. *Procedia Computer Science, 133*.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.112>
- Yadav, S. K., Tiwari, K., Pandey, H. M., & Akbar, S. A. (2021). A review of multimodal human activity recognition with special emphasis on classification, applications, challenges and future directions. *Knowledge-Based Systems, 223*.
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.106970>

Hacia una arquitectura de microservicios para automatizar procesos en la analítica de datos educativos

García Hernández, Alan Diego; Valenzuela Robles, Blanca Dina; Mares Gardea, Arturo Ernesto

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490 México

(Tel: 777 362 7770; e-mail: m21ce058@cenidet.tecnm.mx, blanca.vr@cenidet.tecnm.mx, arturo.mg@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: Una arquitectura de microservicios es un patrón de diseño para elaborar software escalable, extensible y mantenible. Ya que los microservicios se concentran en solo una funcionalidad, se requieren equipos pequeños para su desarrollo y operabilidad. Una arquitectura de microservicios es ideal para abordar problemas multifactoriales como lo es la Analítica Educativa; ya que, en ella influyen desde factores socioeconómicos hasta psico-pedagógicos. Uno de los problemas a los que se enfrenta la Analítica Educativa, es la complejidad para identificar, operar y gestionar los datos disponibles en la institución de educación. En este trabajo se presenta un diseño de arquitectura de microservicios basada en la teoría de la gestión del conocimiento y capital intelectual en instituciones de educación superior, el objetivo de este diseño es dotar a los sistemas de gestión con un grado de abstracción suficiente para facilitar la implementación de analíticas con diferentes grados de beneficio. En la sección final se plantean algunos de los desafíos para el desarrollo de la arquitectura orientada a la analítica educativa, la mayoría de ellos están asociados a la plausibilidad.

Palabras clave: Microservicios, Analítica Educativa, Sistemas de Gestión, Toma de decisiones dirigidas por datos.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los cambios, ajustes o diagnósticos de la condición de una institución de educación superior ocurren como consecuencia de la observación de un fenómeno puntual por parte de los tomadores de decisiones. Seguir esta estrategia limita el margen de las decisiones que se pueden considerar, ya que, en ocasiones no se cuenta con la información suficiente para dar sustento a estos cambios. Para evitar este sesgo, es necesario implementar estrategias con una perspectiva holística, esto quiere decir, considerar a los diferentes elementos del proceso de aprendizaje como un todo y no solo la suma de algunas de sus partes.

Realizar esto no es una tarea sencilla, ya que, en las instituciones educativas se genera y almacena una gran cantidad de información. La parte administrativa de dichas instituciones debe de encargarse de recopilar y gestionar la documentación necesaria para cumplir con los lineamientos que aseguren un reconocimiento de la calidad en sus procesos. De igual manera, en estas instituciones se genera información relevante como: tesis de proyectos de investigación, artículos científicos, memorias de conferencias, cursos de capacitación, entre otra información.

Además, los docentes deben mantenerse a la vanguardia integrando en sus cursos contenido que vaya acorde con las tendencias actuales de la industria, economía, política y

sociedad. Finalmente, los alumnos deben comprometerse en su formación completando su retícula de materias.

Al concluir la formación de los estudiantes se genera una gran cantidad de datos que serán usados para mantener actualizados los planes de estudio y servirán como indicadores de la eficiencia del proceso de enseñanza-aprendizaje.

En este punto se observa que la toma de decisiones en instituciones académicas se ve obstaculizada principalmente por dos razones. La primera, dificultad de acceso a información para la evaluación del desempeño de los procesos educativos. La segunda, identificar relaciones entre las variables que influyen en el proceso educativo es una tarea compleja y demanda una considerable cantidad de tiempo y recursos.

Para solventar estos problemas existen áreas de investigación que han tomado relevancia recientemente (K G & Kurni, 2021), la analítica académica (AA), la analítica educativa (EA), la analítica del aprendizaje (LA) y la minería de datos educativos (EDM), los cuales se dedican al estudio de información ligada al ámbito educativo. Estas áreas buscan responder a las preguntas ¿Qué ha pasado?, ¿Por qué sucedió?, ¿Qué podría pasar? y ¿Cómo podríamos hacer que algo pase?.

A pesar de que estas disciplinas han generado resultados prometedores, aún existen tareas extenuantes en el proceso del descubrimiento de información relevante para la toma de decisiones (Romero & Ventura, 2020), como son: unificar las fuentes dispares de datos mediante el proceso de extracción,

transformación y carga de los datos (ETL); una vez definido el conjunto de datos, implementar técnicas de preprocesamiento de datos para facilitar el reconocimiento de patrones; posteriormente, identificar parámetros e hiperparámetros para ajustar los modelos de aprendizaje automático; validar la fiabilidad de los modelos para predecir futuros escenarios; finalmente, cómo utilizar la información generada para dar sustento a la toma de decisiones.

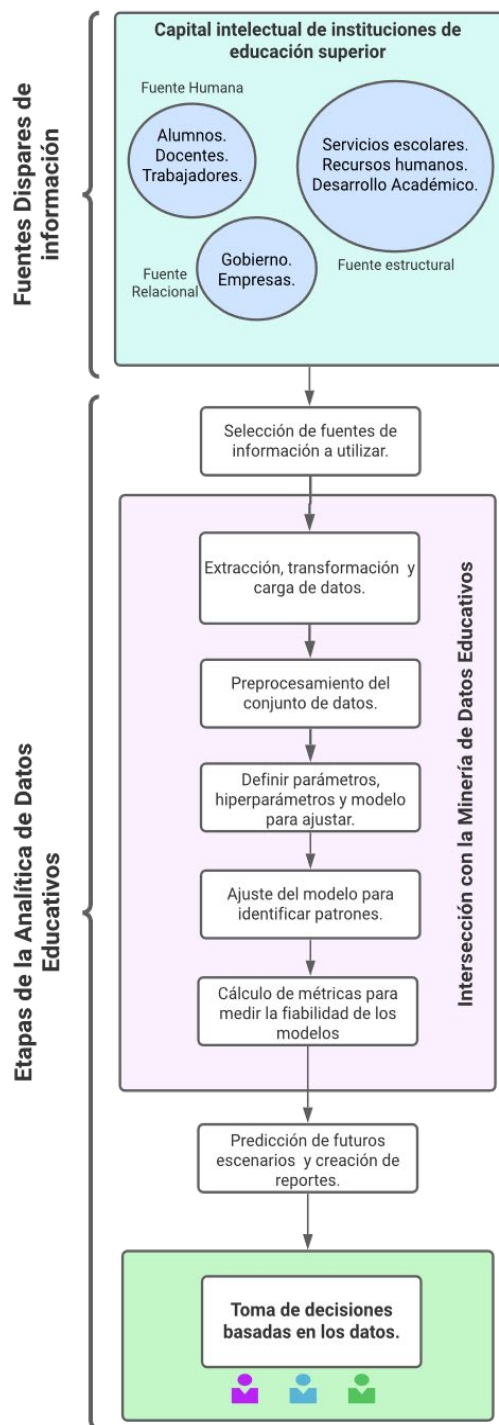


Figura 1. Proceso clásico de Analítica Educativa.

En la **Figura 1**, se presenta un diagrama que permite visualizar las etapas de la analítica en instituciones de educación superior. La EDM se encuentra contenida dentro del proceso de analítica, ya que, se enfoca en los datos, no toma en cuenta de donde provienen ni cómo se usará la información generada.

Para realizar la analítica existen una gran variedad de técnicas, metodologías y herramientas de software (Romero & Ventura, 2020). En las etapas tempranas se requiere del uso de sistemas legados exclusivos de cada institución educativa, los cuales se encargan de realizar la gestión de los datos académicos. A menudo la arquitectura de software de estos sistemas es monolítica, es decir, el programa contiene toda la lógica del dominio del problema. Si se considera que el sistema no necesita interactuar con otros sistemas o que no requiere cambios, implementar este tipo de arquitecturas no representa un problema. Pero, si se considera escalar su funcionamiento, este tipo de arquitecturas tienden a dejar deuda técnica.

Es en este punto donde los encargados de realizar la analítica se ven restringidos. Primero estarán limitados por la información disponible en los sistemas de gestión de la institución, por las políticas de uso de estos datos y por la salida que estos sistemas puedan brindar; segundo si desean automatizar parte del proceso de EDM lo tienen que hacer como un programa externo.

Cuando se realiza analítica de datos, es común que los programas y modelos se desarrollen de forma específica para dar solución al problema que se desea abordar. Lo anterior se debe a que los encargados de realizar la analítica a menudo carecen de la experiencia en el desarrollo de software pensado para reúso. Esto representa una carga de trabajo extra para los encargados de realizar esta tarea, ya que, cuando se cambia el problema de estudio se debe generar el programa/modelo de analítica desde el inicio, se puede apreciar que esto rompe con el principio de no repetición (DRY). Aunado a esto, los programas desarrollados por analistas de datos en ocasiones carecen de abstracción ya que sus soluciones presentan baja cohesión y alto acoplamiento. Una arquitectura basada en microservicios puede ayudar a solventar estos problemas.

Las arquitecturas basadas en microservicios se han vuelto cada vez más populares entre los ingenieros de software que buscan desarrollar aplicaciones escalables para la nube y la web. Sin embargo, aunque la creación y mantenimiento de un microservicio es menos complejo debido a su alcance limitado, el operar, desplegar y orquestar un gran número de microservicios puede ser un desafío. Según Sailer et al. (2021), esta complejidad puede generar dificultades en el desarrollo de aplicaciones basadas en microservicios.

Al realizar un estudio de la gestión del conocimiento y manejo del capital intelectual en las instituciones de educación superior, es posible identificar los diferentes componentes de este proceso y separarlos en dominios independientes que pueden ser transformados en microservicios.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Existen múltiples trabajos que han desarrollado programas y herramientas para realizar analíticas educativas, estos trabajos tienen diferentes alcances en el beneficio que se puede obtener de sus implementaciones (Katarya et al., 2021), a mayor beneficio mayor complejidad al realizar la analítica. Para visualizar de forma más clara la magnitud de los beneficios en la **Figura 2** se presenta un gráfico adaptado del trabajo realizado por Uskov et al. (2019).

Una de las limitaciones a las que se enfrentan las instituciones educativas es la alta demanda de estudiantes que desean ingresar, al tener un cupo limitado, surge la necesidad de implementar criterios de selección más estrictos. En el trabajo realizado por Jeganathan et al. (2021) se aplicaron técnicas de minería de datos para identificar patrones que permitan a las instituciones tomar decisiones estratégicas, esto con la finalidad de mejorar el desempeño académico de los estudiantes y de esta manera incrementar sus probabilidades de ser aceptados en un posgrado. Aplicaron las siguientes técnicas de clasificación: Regresión logística, KNN, Vectores de soporte, algoritmo de predicción Naive Bayes y Árboles de decisión. Los datos utilizados en este trabajo pertenecen a la base de datos de graduados de la Universidad de Carolina, el objetivo de este trabajo es predecir si un estudiante será aceptado en un determinado posgrado en base a la información disponible. Se seleccionaron 500 registros de los cuales 80% fueron usados para el entrenamiento y 20% para las pruebas. Todas las técnicas obtuvieron un grado de precisión superior al 95%, la regresión logística obtuvo 99% de precisión. Este trabajo se ubica en la categoría de analítica predictiva.

Por su parte Jovanović et al. (2021), hacen hincapié en la necesidad de incorporar la especificidad de los cursos y su contexto disciplinar al momento de diseñar modelos predictivos para la LA. La analítica se aplicó sobre la información de 15 cursos del área de medicina, cada curso compuesto (en promedio) de 50 estudiantes, considerando condiciones internas y externas como factores que afectan el proceso de aprendizaje. Se aplicaron modelos de regresión lineal de efectos mixtos para examinar en que magnitud los indicadores del comportamiento de los estudiantes en línea explican la variabilidad de las calificaciones finales. Este estudio con carácter de analítica diagnóstica está fundamentado teóricamente en el constructivismo, en el acercamiento metacognitivo del aprendizaje autorregulado. Las condiciones internas incluyen motivación de los estudiantes, conocimiento previo y estados afectivos, las condiciones externas incluyen requerimientos del curso, disponibilidad del profesor y la manera en la que se presenta la retroalimentación.

Wati et al. (2017) comparan el desempeño de algoritmos de minería de datos para predecir los resultados que pueden obtener los estudiantes, considerando solamente la información disponible en la base de datos de una institución. Se compararon los algoritmos de clasificación Naive Bayes y Árboles de decisión C4.5, siguieron las cuatro etapas principales de la metodología CRISP-DM (entendimiento, preparación y transformación, modelado, evaluación). El conjunto de datos utilizado constaba de 279 registros de estudiantes de la especialidad en informática, los campos de los registros incluían: género, edad, institución previa (pública o privada), especialidad previa (ciencias exactas, ciencias sociales) y

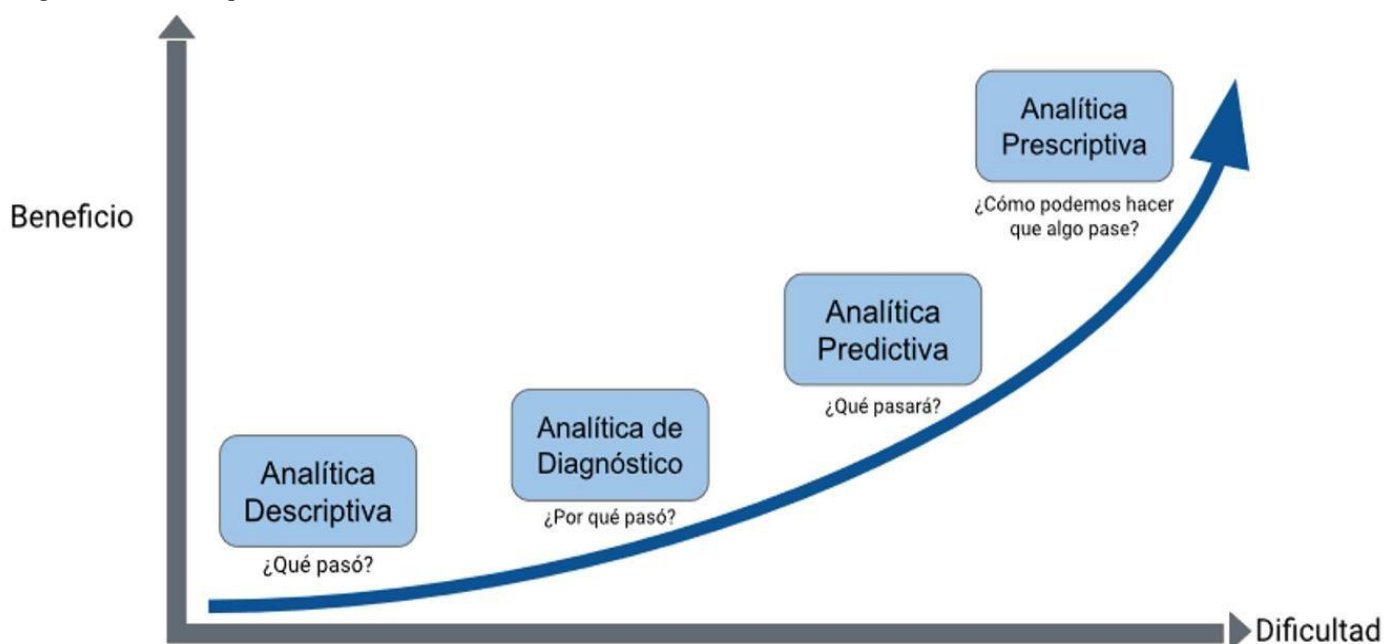


Figura 2. Dificultad de implementar la analítica contra el beneficio que se puede obtener.

promedios del primer semestre al cuarto semestre. Los resultados muestran que se puede obtener una precisión entre 50 y 70%, esto depende del tamaño de la muestra y de la proporción de los datos usados para el entrenamiento. El algoritmo Naive Bayes mostró mejores resultados. Aunque se utilizan técnicas predictivas, el propósito final de este trabajo es de carácter descriptivo.

En el trabajo desarrollado por Simanca H. et al. (2020) se propone una metodología para generar herramientas que puedan ser utilizadas para realizar analítica de datos en la academia considerando factores cuantitativos y cualitativos. Contemplaron incluir en trabajos futuros variables socioeconómicas, socioculturales, institucionales, intelectuales, afectivas, entre otras. Proponen la creación de bases de datos independientes para estudiantes y profesores. Para los estudiantes se contemplan campos como son: clases finalizadas, calificación promedio, créditos completados, asignaturas reprobadas, asignaturas aprobadas, entre otras variables. Para los profesores se contemplaron campos como: evaluación por parte de los estudiantes, evaluación administrativa, número de cursos impartidos y tasa de estudiantes aprobados. Esta metodología está orientada a educación media superior y es para analítica descriptiva, propone el desarrollo de una aplicación que apoye a la parte administrativa de las instituciones en la toma de decisiones, posteriormente el alcance se amplió a alumnos y profesores. Para los cursos en línea identificaron que existe correlación entre el desempeño académico y la participación en el chat, participación en el foro y video colaboraciones. La comunicación causa un gran incremento en el desempeño académico.

Para finalizar, Prada et al. (2020) desarrollaron una aplicación web que permite el apoyo a estudiantes de ingeniería, esta herramienta se desarrolló con un patrón de diseño modelo vista controlador (MVC). Se enfocaron principalmente en que los usuarios de su herramienta no requirieran conocimiento en ciencia de datos para realizar sus analíticas. La herramienta presenta los resultados de los análisis en diferentes formatos, como son: Agrupamientos y representaciones de baja dimensión. Muestran resultados preliminares en la tarea de predecir la deserción escolar con más del 90%. Para este estudio participaron seis instituciones europeas de educación superior, se centraron en el análisis del desempeño de estudiantes en el programa de ingeniería. Consideran un problema importante el adaptar este tipo de estudios en diferentes instituciones por las diferencias que existen en los planes de estudio y la información disponible en sus sistemas de gestión.

3. DISEÑO DE ARQUITECTURA DE MICROSERVICIOS

Para el diseño de la arquitectura de microservicios se toma en consideración el marco de trabajo de diseño genérico para analítica educacional propuesto por Greller y Drachsler (2012) que se presenta en la **Tabla 1**, este marco está compuesto de seis dimensiones que deben ser consideradas cuando se realiza

analítica de datos. La arquitectura propuesta debe facilitar la creación de analíticas tomando en cuenta estas dimensiones.

Tabla 1 Dimensiones consideradas para la analítica

Dimensión	Valores
Partes interesadas	Sujetos de los datos: Estudiantes, investigadores y administradores. Clientes de los datos: Administradores, Investigadores, docentes, estudiantes.
Objetivo	Reflexión: Los resultados de la analítica deben facilitar identificar factores que influyen en el desempeño escolar. Predicción: El modelo generado debe facilitar anticipar futuros escenarios.
Datos	Conjunto de datos protegidos: Resultados de evaluaciones de personalidad, calificaciones asignadas, información del desempeño de profesores, evaluaciones docentes. Indicadores relevantes: Datos de la formación previa de los estudiantes, condiciones socioeconómicas.
Instrumentos	Teoría pedagógica: Socio-constructivismo, el desempeño de los estudiantes está influenciado por las condiciones institucionales, sus formadores y los recursos utilizados. Tecnologías y herramientas: Python, scikit-learn, FastAPI, SQL. Visualización: Tablas, gráfico de pastel, gráficos de barras, gráfico de líneas, tablas concentradoras.
Limitaciones externas	Convenciones: (1) Privacidad, el Sistema no almacenará identificadores de estudiantes o investigadores. (2) Ética, ya que, no se utilizarán identificadores, no se contempla una forma de abusar de esta información generada por la herramienta. Normas: Normas institucionales que rigen el uso de datos de alumnos, investigadores y trabajadores. Escala de tiempo: El modelo evaluará la situación de estudiantes en los primeros semestres de su formación.
Limitaciones internas	Competencias requeridas de los usuarios: (1) Interpretación: Es necesario conocimiento básico en estadística para la interpretación de los datos. (2) Pensamiento crítico: Se requiere conocimiento básico pedagógico para utilizar la información generada para mejorar el proceso de formación.

De igual manera se utilizan elementos de la Teoría de la Gestión del Conocimiento y el capital intelectual, extraídos del trabajo realizado por Ibarra Cisneros et al. (2020). Se entiende por gestión del conocimiento en instituciones académicas al proceso sistémico dividido en cuatro etapas: 1) Creación/Adquisición, 2) Codificación/ Almacenamiento, 3) Transferir/Compartir, finalmente, 4) Uso/Evaluación del conocimiento.

El capital intelectual son los elementos no físicos de las organizaciones que son utilizados para incrementar el desempeño, generar ganancias o sobresalir en el mercado (Obeidat et al., 2021). Se puede separar en capital intelectual humano, capital intelectual estructural y capital intelectual relacional.

Por último, se consideran las características que debe cumplir un microservicio (Sailer et al., 2021), estas características son: 1) Independencia, 2) Tamaño pequeño (se refiere a que debe atender sólo una función del negocio), 3) Interfaz bien definida, 4) Mantener canales de comunicación sencillos, 5) Gestión descentralizada de los datos, 6) Diseño pensado en fallos, 7) Automatización para la integración y pruebas.

Con esta información, se crean subconjuntos del dominio del problema, estos subconjuntos deben implementarse como un microservicio. En la **Figura 3** se presenta de manera simple un diagrama de la arquitectura, cada microservicio debe contar con su propia API y base de datos. Para comunicarse con los clientes externos se propone implementar el patrón “API Gateway” para mantener la seguridad e integridad de los datos.

Para el Sistema de Gestión y Analítica de Datos Académicos (SGADA), se proponen cinco microservicios fundamentales, encargados de administrar el acceso, transferencia y uso del capital intelectual almacenado en la institución. Dos microservicios se encargarán del capital humano, dos se encargan del capital estructural/relacional, y por último un microservicio se encargará de crear, leer, actualizar y borrar (C.R.U.D) modelos de Aprendizaje de Maquinas (ML).

3.1 Ventajas de la Arquitectura de Microservicios

De ser implementada de manera correcta y siguiendo buenas prácticas de programación; una arquitectura de microservicios presenta considerables beneficios para el sistema como son: escalabilidad, extensibilidad, alta cohesión, alta coherencia, bajo acoplamiento, aislamiento de datos, autonomía, genericidad, entre otras. Al manejar las funciones de negocio como subdominios independientes el despliegue es sencillo, ya que, el sistema no debe cargarse en su totalidad cuando ocurre una modificación, cada parte se puede desplegar de forma independiente; al ser de tamaño pequeño, no se requiere un equipo grande de encargados que entienda todo el sistema; en términos de elasticidad se pueden implementar balanceadores de carga y desplegar múltiples copias del microservicio que se requiera. Estos atributos son importantes por la naturaleza del entorno en que el sistema será desplegado/utilizado.

4. DISCUSIÓN

En ocasiones las instituciones de educación superior no cuentan con los recursos necesarios para mantener un departamento especializado en analítica. Realizar estas actividades exige que el personal cuente con una cantidad considerable de habilidades y conocimiento en múltiples herramientas. A menudo, el personal que cuenta con estas habilidades es captado por empresas del sector privado, ya que, estas habilidades son altamente valoradas.

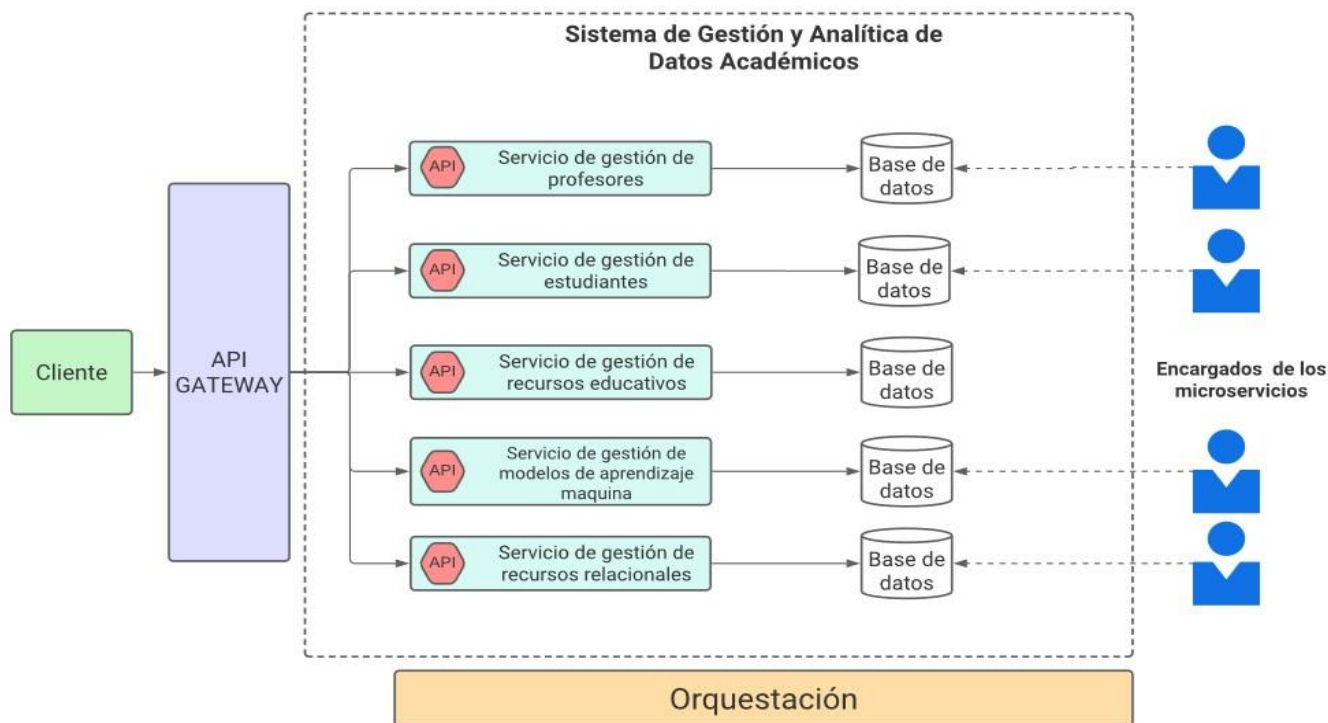


Figura 3. SGDA - Diagrama C4 simplificado.

Otro problema que se enfrenta es que, implementar y mantener una arquitectura de microservicios es una tarea compleja. Se considera prudente utilizar una metodología ágil para el desarrollo del software, ya que, pueden surgir cambios en los requerimientos. Además de automatizar procesos para realizar integración y despliegues continuos. Por otro lado, las variables a considerar en LA, AA y EA son susceptibles al cambio de contexto espaciotemporal, y a las condiciones socioeconómicas. Para mantener la integridad y calidad del sistema, se deben implementar pruebas automatizadas.

Por estos motivos es necesario que la arquitectura cuente con el suficiente nivel de abstracción para ser utilizado en diferentes entornos implicados en el proceso educativo, estas aplicaciones deben poder extender sus funcionalidades de manera sencilla y ser fácilmente mantenibles por un equipo pequeño de personas.

En conclusión, los encargados de crear, mantener, y extender la arquitectura deben tener fundamentos en: 1) Metodologías de desarrollo de software Ágil, 2) Buenas prácticas de programación, 3) Conocimientos del Dominio del problema (analítica Educativa), 4) Patrones de diseño de microservicios y finalmente 5) Prácticas DevOps.

Como trabajo futuro se plantea el desarrollo del microservicio encargado de la gestión de modelos predictivos, ya que, en un diseño dirigido por dominio y un desarrollo dirigido por pruebas es prioridad contar con los elementos para evaluar el funcionamiento de la arquitectura. Poder generar y evaluar los modelos predictivos con los datos con los que cuenta la institución, facilitará el desarrollo de la arquitectura. Aunque, al ser una arquitectura de microservicios, es posible trabajar en múltiples funciones del sistema de forma paralela.

REFERENCIAS

- Greller, W., & Drachsler, H. (2012). Translating Learning into Numbers: A Generic Framework for Learning Analytics. *Educational Technology & Society*, 15, 42–57.
- Ibarra Cisneros, M. A., Vela Reyna, J. B., & Ríos Nequis, E. I. (2020). Capital intelectual, gestión del conocimiento y desempeño en universidades. *Investigación Administrativa*, 49–2. <https://doi.org/10.35426/IAv49n126.06>
- Jeganathan, S., Parthasarathy, S., Lakshminarayanan, A. R., Ashok Kumar, P. M., & Khan, M. K. A. (2021). Predicting the post graduate admissions using classification techniques. *2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics, ESCI 2021*, 346–350. <https://doi.org/10.1109/ESCI50559.2021.9396815>
- Jovanović, J., Saqr, M., Joksimović, S., & Gašević, D. (2021). Students matter the most in learning analytics: The effects of internal and instructional conditions in predicting academic success. *Computers and Education*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104251>
- K G, S., & Kurni, M. (2021). *Introduction to Learning Analytics* (pp. 1–28). https://doi.org/10.1007/978-3-030-70258-8_1
- Katarya, R., Gaba, J., Garg, A., & Verma, V. (2021). A review on machine learning based student's academic performance prediction systems. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 254–259. <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395767>
- Obeidat, U., Obeidat, B., Alrowwad, A., Alshurideh, M., Masa'deh, R., & Abuhashesh, M. (2021). The effect of intellectual capital on competitive advantage: The mediating role of innovation. *Management Science Letters*, 1331–1344. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2020.11.006>
- Prada, M. A., Dominguez, M., Vicario, J. L., Alves, P. A. V., Barbu, M., Podpora, M., Spagnolini, U., Pereira, M. J. V., & Vilanova, R. (2020). Educational Data Mining for Tutoring Support in Higher Education: A Web-Based Tool Case Study in Engineering Degrees. *IEEE Access*, 8, 212818–212836. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040858>
- Romero, C., & Ventura, S. (2020). Educational data mining and learning analytics: An updated survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(3). <https://doi.org/10.1002/widm.1355>
- Sailer, I., Lichtenthäler, R., & Wirtz, G. (2021). *An Evaluation of Frameworks for Microservices Development* (pp. 90–102). https://doi.org/10.1007/978-3-030-71906-7_8
- Simanca H., F. A., Arteaga, I. H., Unriza Puin, M. E., Garrido, F. B., Paez, J. P., Méndez, J. C., & Alvarez, A. (2020). Model for the collection and analysis of data from teachers and students supported by Academic Analytics. *Procedia Computer Science*, 177, 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.039>
- Uskov, V. L., Bakken, J. P., Shah, A., Krock, T., Uskov, A., Syamala, J., & Rachakonda, R. (2019). *Smart Learning Analytics: Conceptual Modeling and Agile Engineering* (pp. 3–16). https://doi.org/10.1007/978-3-319-92363-5_1
- Wati, M., Indrawan, W., Widians, J. A., & Puspitasari, N. (2017). Data mining for predicting students' learning result. *2017 4th International Conference on Computer Applications and Information Processing Technology (CAIPT)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CAIPT.2017.8320666>

Extracción y clasificación automática de opiniones relacionadas con el proceso de evaluación de usabilidad y de la UX mediante la técnica think-aloud en productos software

Bahena-Ríos Cesar*, González-Serna Gabriel*, Castro-Sánchez Noé*, Gómez-Ramírez Juan C.**

**TecNM campus CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México*

(Tel: 777-362-7770; e-mail: m21ce054@cenidet.tecnm.mx, gabriel.gs@cenidet.tecnm.mx, noe.cs@cenidet.tecnm.mx).

***TecNM campus Instituto Tecnológico de Acapulco, Acapulco, Guerrero, México*

(Tel: 744-442-9010; e-mail: juan.gr@acapulco.tecnm.mx).

Resumen: Este artículo presenta un enfoque innovador para la evaluación de usabilidad y de la experiencia del usuario (UX) en productos software mediante la técnica think-aloud y la aplicación de técnicas de Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) y análisis de emociones. Un grupo de usuarios evaluaron prototipos de productos software aplicando la técnica think-aloud, que requiere que verbalicen en voz alta sus pensamientos y emociones mientras exploraban e interactuaban con el prototipo, las cuales fueron grabadas. Los audios se procesaron automáticamente para extraer el texto, posteriormente se aplicaron técnicas de PLN para la extracción automática de opiniones. Se utilizó la herramienta Pysentimiento para obtener la polaridad de cada opinión, y se conformó una bolsa de léxico emocional como filtro para obtener solo las opiniones relevantes para el evaluador de usabilidad y de la UX. Los resultados muestran la efectividad de este enfoque en el proceso de evaluación de la usabilidad y la UX en productos software, lo que podría tener un impacto significativo en la detección de problemas de diseño e interacción en etapas tempranas del proceso de desarrollo de software.

Palabras clave: Análisis de emociones, PLN, think-aloud, usabilidad, UX

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la usabilidad y de la experiencia del usuario (UX) en productos software es un proceso crucial en el desarrollo de software. Sin embargo, la evaluación manual de estos aspectos puede resultar costosa en términos de tiempo y recursos. En este artículo presentamos un enfoque innovador para la evaluación de la usabilidad y la UX en productos software, que combina la técnica think-aloud con técnicas de Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) y análisis de emociones. El enfoque propuesto permite la extracción y clasificación automática de opiniones relevantes relacionadas con la evaluación de usabilidad y de la UX. Para esto, se diseñó un prototipo de página web que fue evaluado por un grupo de usuarios que verbalizaron en voz alta sus pensamientos y emociones mientras exploraban el prototipo. Luego, se procesó cada audio para extraer el texto de forma automática con herramientas de PLN y se aplicaron técnicas de análisis de emociones para la detección de la polaridad de cada opinión. Para mejorar la efectividad del enfoque propuesto, se utilizó una bolsa de léxico emocional como filtro para obtener solo las opiniones relevantes para el evaluador de usabilidad y de la

UX. Los resultados de este estudio muestran la efectividad del enfoque propuesto en la detección temprana de problemas de diseño e interacción en productos software, lo que podría tener un impacto significativo en el proceso de desarrollo de software y mejorar la experiencia del usuario final.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de las pruebas realizadas en esta investigación se describen los detalles de los materiales y métodos utilizados, así como el porqué de cada uno.

2.1 Prototipo software

Para el diseño de prototipo de media fidelidad se utilizó el software Balsamiq (*Balsamiq. Rapid, effective and fun wireframing software*, n.d.) (Fig. 1) el cual cuenta con aspectos básicos como hipervínculos, botones, cajas de selección, entre otros elementos de interacción, este prototipo se utilizó en el proceso de evaluación de usabilidad y de UX, para dicha evaluación se conformó un grupo de 10 usuarios que evaluaron el prototipo mediante exploración e interacción,

aplicando la técnica think-aloud, misma que se explica más adelante, los usuarios realizaron tareas simples como selección de elementos, simulación de carga y descarga de archivos, entre otras acciones, en prototipos de media fidelidad se simula la interacción y navegación, carecen de diseño visual y funcionalidad real.

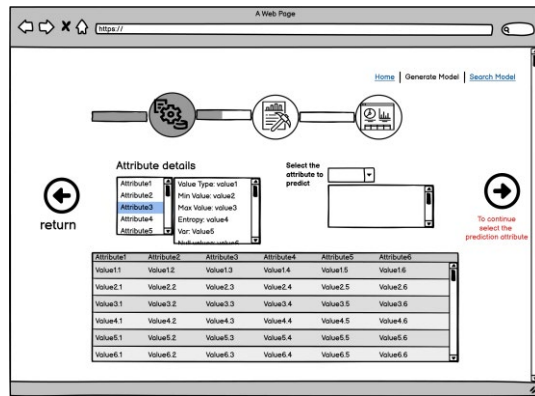


Fig. 1 Página prototipo

2.1 Pysentimiento

La extracción de opiniones provenientes de diversos textos ha sido de gran interés en los últimos años ya que permite obtener información valiosa sobre diversas temáticas, sin embargo, un problema que se distingue en este ámbito es la falta de herramientas para minería de opinión que sean multilinguaje o que trabajen específicamente con idioma español, por ello, se desarrolló Pysentimiento (Pérez et al., 2021), un conjunto de herramientas para el análisis de sentimientos y procesamiento del lenguaje natural, con la ventaja de procesar directamente el problema antes mencionado, permitiendo trabajar en idioma español, además de ser una librería de código abierto para permitir a los investigadores acceder de manera más fácil y controlada.

Con el uso de esta librería se implementó el módulo para clasificar automáticamente la polaridad de los comentarios extraídos del texto que se transcribió de manera automática de los usuarios participantes, este módulo será descrito a detalle más adelante.

Las métricas de evaluación que se aplicarán a esta investigación son, Precision (1), Recall (2), F1-Score (3) y dos más calculadas con base en ellas que son Micro F1 (4) y Macro F1 (5), estas se describen a continuación y son obtenidas a través de la matriz de confusión (Fig. 2)

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FP} (2)$$

$$F1 - Score = \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} (3)$$

$$Micro F1 = \frac{2 * (Precision * Recall)}{Precision + Recall} (4)$$

$$Macro F1 = \frac{Sum(F1 scores)}{Number of classes} (5)$$

VALORES PREDICCIÓN	Verdaderos positivos	Falsos Positivos
	Falsos Negativos	Verdaderos Negativos
VALORES REALES		

Fig. 2 Matriz de confusión (Arce, 2019)

De los resultados obtenidos de la herramienta pysentimiento en la Tabla 1 se destacan los obtenidos en el proceso de análisis de sentimientos en español con las diferentes bases de datos utilizadas, siendo con *beto* las métricas más altas con 0.672 y 0.667 para Micro f1 y Macro f1 respectivamente, este tema se abordará de igual forma más adelante.

Tabla. 1. Métricas de evaluación de pysentimiento (Pérez et al., 2021)

Model	Sentiment		Emotion	
	Micro f1	Macro f1	Micro f1	Macro f1
distilbert	0.649	0.642	0.503	0.383
mbert	0.645	0.643	0.516	0.394
en bert	0.686	0.684	0.559	0.439
roberta	0.686	0.684	0.563	0.445
bertweet	0.697	0.696	0.584	0.476
distilbert	0.602	0.599	0.600	0.463
es mbert	0.609	0.604	0.610	0.474
beto	0.672	0.667	0.688	0.548

2.2 Léxico emocional

La minería de opinión y análisis de sentimientos se ha convertido en una rama de interés para el ámbito del procesamiento del lenguaje natural, para lograr tareas que busquen estos objetivos se han implementado diversos recursos léxicos, que en su mayoría son para el idioma inglés, estando muy limitados para el español o incluso recursos inexistentes para algunos casos. Para tratar este problema, algunos autores desarrollaron trabajos que conforman las principales contribuciones, en esta investigación se enfocó principalmente en dos, en (Castro-Sánchez, 2015) se conformó una bolsa de léxico afectivo con diversos recursos, que incluyen obras basadas en teorías psicológicas para identificar palabras asociadas a emociones, por otra parte, en (Díaz Rangel, 2014) se presenta un método para la creación de diccionarios etiquetados, conformando un léxico emocional etiquetado con seis emociones relacionadas.

Derivado de los trabajos identificados en la revisión de la literatura, se procedió a descargar los corpus de palabras para analizarlos, en este proceso se encontramos que el primer corpus contenía 3344 palabras emocionales y el segundo 2036, cada uno con una estructura similar y orientada al trabajo que presentaron los autores, se procedió a extraer solo las palabras para conformar un solo corpus de léxico emocional (LE) verificando que no hubiera palabras duplicadas y organizándolas en orden alfabético, así mismo se comprobó palabra por palabra que estuvieran lematizadas, es decir, que estuvieran escritas en su forma más básica, el resultado fue un corpus de LE conformado por 4400 palabras, la (Fig. 3) muestra un fragmento de dicho corpus.

```
listaEmocionalFinal=["abajamiento", "abajo ", "abandonado", "abochornar", "abofetear", "abolir", "abollado", "abolladura", "abrasivo", "abrazar", "abrazo", "abrigado", "abrigar", "abundante", "abundantemente", "abundar", "aburrido", "aburrir", "accidente", "acción", "acechar", "acecho", "aceptable", "acoger", "acogedor", "acogedoramente", "acoger", "acojonante", "acomodar", "acongojado", "acongojar", "aconsejable", "aconsejar", "acuchillar", "acuciar", "acucioso", "acuerdo", "acuitadament", "adherente", "adhesión", "adicción", "adicto", "adivinanza",
```

Fig. 3 Fragmento del léxico emocional

2.3 Whisper

Whisper (Radford et al., 2022) es un modelo de reconocimiento del habla para propósitos diversos, está entrenado con un conjunto de datos de audio de diversa procedencia, también se puede utilizar para el reconocimiento de voz multilingüe, traducción de voz e identificación de idiomas, en la revisión de la literatura es la herramienta que obtiene los mejores resultados en el proceso de transcribir un audio a texto (STT), llegando incluso a tener tan solo una tasa de error de palabras (WER) del 3% para el español, métrica aplicada para evaluar sistemas de reconocimiento automático del habla (Chen, 2021), lo cual, mejora incluso que el error humano que ronda el 4% aproximadamente, es por esto que se utilizó como transcriptor automático en esta investigación.

2.4 Método think-aloud

Es un método de análisis cualitativo, existen dos variantes Think-Aloud Protocol (TAP) y Co-Operative Evaluation Think-Aloud (CETA), para esta investigación se aplicó el método TAP, es la variante más común y consiste en pedirle al usuario que exprese en voz alta lo que está pensando mientras interactúa con el producto software. Durante la interacción, el usuario es observado y grabado mientras intenta completar una serie de tareas en el producto software. A medida que el usuario realiza las tareas, debe hablar sobre sus pensamientos y sentimientos, lo que le permite al evaluador comprender mejor la forma en que el usuario interactúa con el producto y las posibles dificultades, relacionadas con la usabilidad y la UX, que pueda encontrar. El objetivo de esta técnica es obtener información detallada sobre la experiencia del usuario al interactuar con un producto software, incluyendo las dificultades, los errores, las expectativas y las impresiones generales, estas opiniones son extraídas manualmente y analizadas por experto aplicador. Estas pruebas se caracterizan por su fácil implementación siendo que no requiere gran esfuerzo monetario o logístico, al no necesitar de equipos costosos ni una gran planeación. Una de las ventajas destacables de esta prueba son las reacciones espontáneas de los participantes al no tener mucho tiempo para pensar y así dando su opinión más sincera.

Sin embargo, hay dos vulnerabilidades asociadas a la técnica TAP, 1) el sesgo de aquiescencia, que es la tendencia de las personas a estar de acuerdo con los demás y 2) el sesgo de deseabilidad social, que es el deseo de informar puntos de vista que otros considerarán favorablemente.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Pruebas think-aloud Protocol (TAP)

Se registro la participación de 10 usuarios que aplicaron la técnica think-aloud Protocol (TAP), los participantes evaluaron un prototipo de media fidelidad descrito en la sección 2.1, se utilizó una herramienta desarrollada en el TecNM/CENIDET llamado QUXBox, para grabar el video y audio de los interacciones de usuarios participantes, se obtuvieron 10 archivos de audio con toda la verbalización que los usuarios realizaron, al mismo tiempo, adicionalmente, se grabó video del rostro de los usuarios y se registraron datos de movimiento ocular (eye-tracking) para su posterior análisis. Como se mencionó anteriormente, no fue necesario adquirir equipo en esta investigación, se adaptó un aula con las condiciones ergonómicas adecuadas para realizar las pruebas y se utilizó un equipo de cómputo con un micrófono direccional como se muestra en la (Fig. 4).



Fig. 3 Setup de pruebas think-aloud + QUXBox

3.2 Transcripción y separación de comentarios

Una vez que finalizaron las pruebas, se utilizó la herramienta whisper (Radford et al., 2022) para realizar el proceso de transcribir los audios a texto (STT), en la (Fig. 5) se muestra el resultado de una transcripción de audio.

Audio1

tengo que hablar ok, los logos no van donde corresponden el título pues está monto nada encima de los logos en cuanto a los links de home y todo, pues están en el lugar correcto la descripción corta o resumen, no sé cómo lo quieren decir pues yo creo que no, está un poco arriba y el texto, los encabezados son muy chiquitos y el texto no se ve nada en cuanto a los logos, se requieren que sean un poco más grandes, más vistos se requiere que la página sea más vistosa con colores y cosas así de ese tipo pues no sé qué más necesidad de indicar si aquí en el título no tiene nada las letras no se ven, en los logos yo creo que están si extendemos el logo un poquito más hacia la izquierda y centrado que no esté aquí todo, tiene mucho espacio tiene mucho espacio en esta parte, en esta y en esta que debería de utilizar el título aquí en alto, que se vea negro o sea, que se distinga, que tenga algo de colores, estas cosas no sé qué sea un párrafo, es una persona en

Fig. 4 fragmento de texto transcrito

Un problema que tienen todos los modelos de reconocimiento automático del habla es la puntuación, normalmente fallan en esta tarea al poner u omitir signos en donde corresponden, y es debido a diversos factores como las pausas que hace el hablante, el uso de muletillas, etc., sin embargo, whisper a diferencia de otras herramientas demostró que es capaz de escribir puntuación casi siempre en el lugar correcto, por ello, es que se decidió realizar la separación del texto plano que arroja la herramienta a través de puntos y comas, para extraer comentarios pequeños y realizar el proceso para identificar la polaridad correspondiente de cada uno de los comentarios de forma manual y automática. Como resultado, se obtuvieron al final un total de 1062 comentarios extraídos de un total de diez archivos de audio.

3.3 Clasificación manual y automática de comentarios

Como se mencionó en la sección anterior, se extrajeron los comentarios de los participantes para poder clasificarse de forma manual y automática, para esto, se creó un libro de Excel en donde se plasmaron todos y cada uno de los comentarios, posteriormente mediante la ayuda de expertos en lingüística se

realizó el proceso de etiquetado manual de la polaridad, se utilizaron tres etiquetas: *Positivo*, *Neutral* y *Negativo* según fuera el caso, en la (Fig. 6) se muestra un fragmento del libro de Excel donde se almacenaron los 1062 comentarios con su respectiva etiqueta relacionada con la polaridad.

Número	Comentario	Etiqueta
1	tengo que hablar ok	NEU
2	los logos no van donde corresponden el título pues está monto nada encima	NEG
3	pues están en el lugar correcto la descripción corta o resumen	NEU
4	no sé cómo lo quieren decir pues yo creo que no	NEU
5	está un poco arriba y el texto	NEU
6	los encabezados son muy chiquitos y el texto no se ve nada en cuanto a los	NEG
7	se requieren que sean un poco más grandes	NEU
8	más vistos se requiere que la página sea más vistosa con colores y cosas a	NEG
9	en los logos yo creo que están si extendemos el logo un poquito más hacia	NEU
10	tiene mucho espacio tiene mucho espacio en esta parte	NEU

Fig. 5 Etiquetado manual de comentarios

El siguiente paso fue aplicar el etiquetado automático utilizando la herramienta pysentimiento, se procedió a clasificar todos los comentarios de forma automática obteniendo sus etiquetas correspondientes, de esta forma el libro de Excel recibió una nueva columna como se aprecia en la (Fig. 7).

Número	Comentario	Etiqueta	Clasificado
1	tengo que hablar ok	NEU	NEU
2	los logos no van donde corresponden el título pues está monto nada encima	NEG	NEG
3	pues están en el lugar correcto la descripción corta o resumen	NEU	NEU
4	no sé cómo lo quieren decir pues yo creo que no	NEU	NEU
5	está un poco arriba y el texto	NEU	NEU
6	los encabezados son muy chiquitos y el texto no se ve nada en cuanto a los	NEG	NEG
7	se requieren que sean un poco más grandes	NEU	NEU
8	más vistos se requiere que la página sea más vistosa con colores y cosas a	NEG	NEG
9	en los logos yo creo que están si extendemos el logo un poquito más hacia	NEU	NEU
10	tiene mucho espacio tiene mucho espacio en esta parte	NEU	NEU

Fig. 6 Etiquetado automático de comentarios

Con estos datos se obtuvo la matriz de confusión que se muestra en la Tabla 2 para ver la precisión de pysentimiento en un contexto de pruebas think-aloud.

Tabla 2 Matriz de confusión 1

		True class		
		POS	NEU	NEG
Predicted class	POS	57	6	0
	NEU	9	832	30
	NEG	1	27	100

Se puede observar que se obtuvo una cantidad considerable de comentarios neutrales que el algoritmo identificó (832), comparando con el etiquetado manual se observó una vez etiquetados los 1062 existentes podemos observar que el 82% son efectivamente neutrales, en la Tabla 3 muestra los porcentajes de cada clase.

Tabla 3 Porcentaje de existencia de cada clase

POS	NEU	NEG	TOTAL
63	871	128	1062
6%	82%	12%	100%

Obtenida la matriz de confusión previamente mostrada se procedió a calcular las métricas *Micro f1* (4) y *Macro f1* (5) que se proponen en (Pérez et al., 2021), los resultados fueron del 93.1% y 87.0% respectivamente, siendo estas mejores que las que se observaron anteriormente en la Tabla 1, con una mejora del 25.9% para *Micro f1* y 20.3% para *Macro f1*, se intuye que la mejora se debe a la clasificación de comentarios que en su mayoría son cortos, contrario, por ejemplo, a comentarios que encontramos en redes sociales donde son más extensos y tienen carga emocional de todo tipo.

3.4 Implementación del léxico emocional

Los recursos léxicos ayudan en las tareas de minería de opinión y análisis de sentimientos, en este caso, se observó que el 82% de los comentarios, eran neutrales, lo cual, se explica debido a que los participantes suelen narrar muchas las acciones que realizan, en lugar de verbalizar comentarios con algún tipo de polaridad relacionados con criterios de usabilidad o de la UX, por ello se decidió implementar un filtro basado en un léxico emocional que permitió al examinador extraer solo comentarios que incluían léxico con carga emocional y que también sean relevantes, evitando así, comentarios que no aportan nada a la evaluación, por ejemplo “doy clic aquí”, “este es el logo”, “ok”. Para complementar el análisis, se agregó una columna nueva en el libro de Excel que se etiquetó con “LE” (Léxico Emocional) a todos aquellos comentarios que tuvieran alguna palabra del léxico definido, finalmente se calculó nuevamente la matriz de confusión omitiendo todo aquel comentario que no cumpliera con el filtro, esta se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Matriz de confusión 2

		True class		
		POS	NEU	NEG
Predicted class	POS	52	0	0
	NEU	6	278	10
	NEG	1	3	61

Se puede observar que hay un contraste con la matriz de confusión 1, hubo una reducción del 66.6% sobre los comentarios neutrales, reduciendo estos a 278, sin embargo, también se observó que la cantidad de comentarios negativos disminuyó en un 39%. Revisando la lista se encontró que muchos comentarios no contenían ninguna palabra del léxico emocional (LE) pero estaban bien clasificados y aportaban información valiosa para el examinador, por ejemplo, “los logos no van donde corresponden” es un comentario negativo que no pasa el filtro pero que debería tomarse en cuenta, por lo que se decidió utilizar dicho filtro solo para los etiquetados neutrales, de esta forma se obtienen entonces un total de 485 comentarios útiles, que aportan información relevante, omitiendo gran cantidad de neutrales que no tienen relevancia.

4. DISCUSIÓN

En esta investigación se logró combinar técnicas de procesamiento de lenguaje natural, así como reconocimiento automático de voz y análisis de sentimientos para poder comprobar que algunas herramientas que funcionan con modelos entrenados pueden mejorarse sin la necesidad de volver a realizar un entrenamiento, aplicando otros recursos que se tienen en el momento, por ejemplo, en este caso, la utilización de léxico emocional para filtrar y extraer solo comentarios que cuentan con carga emocional, logrando así mejorar las métricas que el clasificador de polaridad de opinión tiene, sin embargo sería interesante demostrar en otros trabajos la utilización de este y otros recursos léxicos para otras situaciones de evaluación de productos, ya que en este trabajo solo se aborda la evaluación de productos digitales.

5. CONCLUSIONES

Los recursos léxicos son algo indispensable para la minería de opinión y la tarea de crearlos también para idiomas diferentes del inglés es totalmente viable y funcional, esto es algo que se demuestra en esta investigación al obtener métricas superiores al 90% en su utilización, además la mezcla de estos recursos da pie a trabajos que mejoran las implementaciones y resuelven problemáticas aún no abordadas.

Como se pudo notar, los participantes suelen verbalizar en su mayoría las acciones que realizan y no comentarios con una carga emocional, sin embargo dentro de los comentarios que sí cuentan con carga emocional se demuestra que en su mayoría son neutrales, seguido de negativos y finalmente positivos, también suelen dejar de hablar después de tiempos determinados, por lo que para investigaciones futuras podría proponerse una metodología más específica para las pruebas think-aloud en la que se presentaran especificaciones para los participantes y así obtener mejores resultados, por ejemplo, proporcionar a los usuarios algunos ejemplos de comentarios con carga emocional, recordarles de alguna manera el continuar

hablando en la prueba, no leer los textos que leen en pantalla, etc.

Se propone también continuar con este trabajo hacia una mejora más en la extracción y clasificación de opiniones al incorporar un filtro extra donde se categoricen todos los comentarios, por ejemplo los relacionados a la interfaz o a la funcionalidad para así poder hacer un cálculo independiente de satisfacción de cada una y proponer mejoras automáticas en el prototipo que se está evaluando.

6. REFERENCIAS

Arce, J. I. B. (2019, July 26). La matriz de confusión y sus métricas. Juan Barrios. <https://www.juanbarrios.com/la-matriz-de-confusion-y-sus-metricas/>

Balsamiq. Rapid, effective and fun wireframing software. (n.d.). Balsamiq.com. Retrieved March 31, 2023, from <https://balsamiq.com/>

Castro-Sánchez, N. A., Baca-Gómez, Y. R., & Martínez, A. (2015). Development of affective lexicon for Spanish with Mexican slang expressions. *Research in Computing Science*, 100(1), 9–18. <https://doi.org/10.13053/rcs-100-1-1>

Chen, H. (2021, January 20). Does Word Error Rate matter? SmartAction. <https://smartaction.ai/blog/does-word-error-rate-matter/>

Díaz Rangel, I., Instituto Politécnico Nacional, Sidorov, G., & Suárez Guerra, S. (2014). Creación y evaluación de un diccionario marcado con emociones y ponderado para el español. *ONOMAZEIN*, 29, 31–46. <https://doi.org/10.7764/onomazein.29.5>

Pérez, J. M., Giudici, J. C., & Luque, F. (2021). pysentimiento: A Python Toolkit for Sentiment Analysis and SocialNLP tasks. In arXiv [cs.CL]. <http://arxiv.org/abs/2106.09462>

Radford, A., Kim, J. W., Xu, T., Brockman, G., McLeavey, C., & Sutskever, I. (2022). Robust speech recognition via large-scale weak supervision. In arXiv [eess.AS]. <http://arxiv.org/abs/2212.04356>

Test Thinking Aloud. (n.d.). RYTE.com. Retrieved March 31, 2023, from https://es.ryte.com/wiki/Test_Thinking_Aloud

Extracción y caracterización de señales de voz para la identificación de emociones

Cynthia Bustos Gutiérrez, Alicia Martínez Rebollar, Hugo Estrada Esquivel, María Yasmín Hernández Pérez.

Departamento de Ciencias de la Computación, TecNM/CENIDET, Morelos 62490, México;

m21ce055, alicia.mr, hugo.ee, yasmin.hp {@cenidet.tecnm.mx}

Abstract: La determinación de emociones con mecanismos computacionales es un tópico relevante para muchos grupos de investigación en el mundo. Actualmente se reconoce la importancia de la voz como un medio para la determinación automática de emociones. En este trabajo se presenta una metodología para la extracción y caracterización de señales acústicas de la señal de voz que permiten la selección de parámetros representativos en la voz, que son aplicados en la identificación de emociones. Se analizan 7 emociones básicas de una persona (Tranquilo, feliz, enojado, triste, temeroso, asco, sorprendido) además del estado neutral.

Palabras clave: Análisis acústico, Caracterización de la señal de voz, emociones.

1. INTRODUCCIÓN

Las emociones son un estado afectivo que se experimentan constantemente, incluso se suele categorizar las emociones para así poder evitar las emociones desagradables y aceptar las emociones que resultan satisfactorias. Una emoción es un sentimiento que surge cuando la persona reacciona de manera subjetiva al ambiente, generando así un estado afectivo que va acompañado de cambios físicos involuntarios (sudoración, ritmo cardíaco acelerado, etc.) puesto que las emociones pueden causar reacciones neurofisiológicas, conductuales y cognitivas (Psiquiatría, 2021). Las emociones también suelen describirse utilizando sinónimos tales como sentimiento, afecto, motivación o estado de ánimo.

Las emociones han sido clasificadas en dos grupos: positivas y negativas. En numerosas investigaciones de detección de estados emocionales se observa de manera generalizada dicha clasificación (Baena Zuñiga et al., 2005, 3-14). Las emociones positivas abren nuevas posibilidades para aprender y mejorar habilidades. Por otro lado, las emociones negativas nos alertan de las amenazas o desafíos que debemos enfrentar a nuestro alrededor, es decir, se centran en nuestra conciencia (Frederickson, n.d.).

En la actualidad, existen varios instrumentos psicológicos, como test y entrevistas personales, para evaluar y detectar el tipo de emociones que predominan en cada individuo. En la literatura, diversos autores han trabajado en la detección y el análisis de emociones y en los mecanismos para identificarlas. Por ejemplo, el análisis de reconocimiento facial (Iglesias-Hoyos & del Castillo Arreola, n.d.), análisis de textos (Martínez Rodríguez, n.d.) (Shah Fahad, 2020), análisis de la respiración y sus cambios en el tono de voz para identificar emociones (Zhang, 2017), análisis de voz en centros de atención telefónica (Orozco Castaño, n.d.) (Badsha, 2020,) (Egger, 2019).

Un ser humano puede leer el estado emocional de otro, y saber reaccionar de la mejor manera para sobrellevar su comunicación en ese momento. Esto se debe a que las emociones se pueden reconocer a través de las palabras, la entonación de la voz, las expresiones faciales y el lenguaje corporal. De esta manera, la voz es el principal medio de comunicación entre las personas, además de contener información sobre el mensaje que se desea transmitir, sus emociones y sus estados fisiológicos.

De acuerdo a la investigación de Cabrelles Sagredo (Cabrelles Sagredo, 2008) una emoción afecta a los movimientos musculares del aparato respiratorio y la laringe y ello modifica el tono de voz de las personas. Las emociones están intrínsecamente conectadas con la forma en que las personas interactúan entre sí. Existen numerosas investigaciones que trabajan con la detección de estados emocionales utilizando el procesamiento de la señal de voz, donde se han encontrado algunos de los componentes del habla que se emplean para la expresión de emociones: el pitch, la energía y la intensidad en la voz. Por lo tanto, podemos establecer características prototípicas de algunas emociones básicas en relación con la entonación denominada altura del sonido.

Esta investigación plantea la metodología de extracción y caracterización de señales acústicas de la voz que permite la selección de parámetros representativos en la voz, con el fin de determinar el estado emocional de una persona.

Este artículo está estructurado como sigue. La Sección 2 presenta los fundamentos teóricos y trabajos relacionados, La Sección 3 muestra un resumen de la propuesta presentada; la Sección 4 muestra la descripción del proceso de extracción de características. La Sección 5 muestra las pruebas realizadas para la extracción de características. Finalmente, la Sección 6 muestra las Conclusiones y trabajos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y TRABAJOS RELACIONADOS

En esta sección se presentan los conceptos y teorías utilizados en esta investigación, así como los trabajos relacionados relevantes para la investigación realizada.

2.1 Características Acústicas de la voz

La voz es el medio de comunicación más utilizado entre las personas a lo largo de la historia con lo cual podemos mantener conversaciones cortas o largas. La voz humana genera una gran cantidad de emociones, provoca sentimientos y construye vínculos entre las personas. Las características acústicas de la voz son aquellas que poseen algún significado físico, lo cual permite una clasificación de cualidades vocales. Generalmente se utilizan cuatro cualidades subjetivas para describir de mejor manera un sonido: intensidad, tono timbre y duración. Cada uno de estos atributos depende de uno o más parámetros físicos para poder ser medido.

A continuación, se describen los parámetros de las medidas acústicas de la voz organizados en 3 categorías: Parámetros de la perturbación de la frecuencia, Parámetros de la perturbación de la amplitud y Parámetro de ruido (Carlos Ariel Ferrer-Riesgo, 2007).

Parámetros de la perturbación de la frecuencia:

- Jitter (*local*): representa la variabilidad absoluta de la frecuencia periodo a periodo, dividido por la frecuencia media total de los periodos de la señal.
- Jitter (*local, absolute*): es la diferencia absoluta media entre periodos consecutivos.
- RAP (*Relative Average Perturbation*): corresponde a la variabilidad relativa de la frecuencia entre un periodo y la media de los dos periodos contiguos, dividido por la frecuencia media total de los periodos de la señal. Aporta, por tanto, un suavizado de tres ciclos.
- PPQ5 (*Five-Point Period Perturbation Quotient*): corresponde a la variabilidad relativa de la frecuencia entre un periodo y la media de los cuatro periodos contiguos, dividido por la frecuencia media total de los periodos de la señal. Aporta, por tanto, un suavizado de cinco ciclos.

Parámetros de la perturbación de la amplitud:

- Shimmer (*local*): Representa la variabilidad absoluta entre la amplitud de periodos consecutivos, divididos por la media total de la amplitud.
- Shimmer (*local, absolute*): es el logaritmo en base 10 de la media absoluta de la diferencia entre la amplitud de periodos consecutivos, multiplicado por 20.
- APQ3 (*Three-Point Amplitude Perturbation Quotient*): Corresponde a la variabilidad absoluta entre la amplitud de un periodo y la media de las amplitudes de los dos

periodos contiguos, divididos por la media total de la amplitud.

- APQ5 (*Five-Point Amplitude Perturbation Quotient*): Corresponde a la variabilidad absoluta entre la amplitud de un periodo y la media de las amplitudes de los cuatro periodos contiguos, divididos por la media total de la amplitud.
- APQ11 (*Eleven-Point Amplitude Period Perturbation Quotient*): Representa a la variabilidad absoluta entre la amplitud de un periodo y la media de las amplitudes de los diez periodos contiguos, divididos por la media total de la amplitud.

Parámetro de ruido:

- HNR (*Mean Harmonic to Noise Ratio*): La relación armónico-ruido es la medida que cuantifica la cantidad de ruido aditivo en la señal de la voz. Es el logaritmo en base 10 de la ratio entre la energía periódica y la energía correspondiente al ruido, multiplicado por 10.
- Formantes de frecuencia: Son picos de frecuencia que tienen en el espectro un alto grado de energía.
- Coeficientes cepstrales en la Frecuencia de Mel (*MFCC*): Son una representación definida como el cepstrum de una señal ventaneada en el tiempo que ha sido derivada de la aplicación de una transformada rápida de Fourier, pero en una escala de frecuencias no lineal, las cuales se aproximan al comportamiento del sistema auditivo.
- Vector croma (*Chroma vector*): Es un espectrograma que representa la energía espectral de las 12 clases de tono.
- Tasa de cruces por cero (*Zero Crossing Rate*): Representa la cantidad de veces que la señal cambia de signo, de positivo a negativo y viceversa. Se emplea para medir el ruido en una señal.
- Energía (*Energy*): También llamado fuerza de una señal. Cuando un audio tiene un volumen alto tendrá mucha energía, esta característica también es usada para identificar silencios.
- Intensidad: se relaciona con la amplitud de la frecuencia, depende principalmente de la presión sonora y se relaciona en proporción directa con el volumen. Mediante este parámetro podemos diferenciar sonidos débiles (suaves) y fuertes (intensos). En la voz humana la intensidad se regula mediante el control del proceso de inspiración y expiración. Otros factores físicos que afectan en menor medida la intensidad son el espectro de parciales (armónicos) y la duración.

2.2 Estado del arte

Se presenta a continuación el resumen de los artículos relevantes para el tema de identificación de emociones. Algunas investigaciones se enfocan en la comparación de frecuencias que pueden ser detectadas en medio de audios donde existe interacción humana. En cambio, otras investigaciones analizan la experiencia y los resultados obtenidos por los usuarios en pruebas realizadas por ellos.

En (Pérez Espinosa, 2011, 62-71) se presenta la creación de una base de datos emocional de habla inducida en español, la cual lleva por nombre "EmoWisconsin". La base de datos fue creada con niños de entre 7 y 13 años de edad (11 niñas y 17 niños) mientras realizaban un juego de cartas bajo supervisión de un adulto que examinaba el proceso. Se utilizó una prueba piloto para determinar 6 estados emocionales inducidos: dudoso, molesto, motivado, nervioso, neutro y seguro. Los autores utilizaron la herramienta OpenEAR para extraer las siguientes características: Energía, probabilidad de sonoridad, MFCC, energía espectral en bandas, flujo espectral, máximo y mínimo espectral, tasa de cruce por ceros, contorno F0, espectro MEL, punto rolloff espectral, centroide espectral. Estas características se utilizaron para la determinación de las emociones de enojo, alegría y tristeza.

En (Echeverry Correa, 2008, 113-130) se utiliza una base de datos emocional en español, denominada SES, que contiene 5 emociones: alegría, enojo, neutral, sorpresa y tristeza. La base de datos utilizada fue grabada por un actor profesional que simulaba las emociones. En este artículo se realizó un análisis en el dominio temporal y un análisis acústico empleando los coeficientes Cepstrales en la Frecuencia de Mel. Posteriormente, durante la caracterización se emplearon técnicas para extracción de características de la señal de voz: datos crudos y MFCC. En la etapa de clasificación se utilizó un clasificador basado en la teoría de Bayes para entrenar un sistema que es capaz de realizar el reconocimiento automático de emociones.

En (Bojanic, 2013, 459-465) se utiliza una base de datos emocional en idioma serbio que contiene 5 emociones: alegría, enojo, miedo, neutral y tristeza. Los autores comparan grupos de características de la voz para conocer cuáles son las mejores y formar un vector de características que sean eficientes para el reconocimiento de emociones. En la etapa de caracterización se extraen características prosódicas y espectrales. Para validar estas características se utilizaron 3 modelos de clasificación: Vecinos más cercanos, Análisis discriminante lineal (LDA) y redes neuronales.

Con relación al análisis de características acústicas de la voz en (Tsang-Long, 2017, 157-162) se hace uso de una base de datos emocional que contiene 6 emociones: aburrimiento, alegría, enojo, tristeza y neutral. Los autores realizaron un estudio para determinar cuáles son las características más discriminatorias a partir de un conjunto de 78 características. En el artículo se hace uso del corpus MCEC2010, el cual es una base de datos emocional que fue grabada en idioma chino por 34 actores profesionales (13 hombres y 21 mujeres). Se realizó una

extracción de características donde obtienen 13 conjuntos de características que incluyen: formantes, Shimmer, Jitter, Coeficiente de predicción lineal, Coeficientes Cepstrales en la Frecuencia de Mel, Coeficientes de Potencia de Frecuencia Log, Predicción Lineal Perceptual, Espectral Relativo PLP, Log-Energía y Tasa de Cruces por Ceros. Todas estas características se examinan para determinar cuál es el conjunto de características más discriminantes para el reconocimiento de emociones en el habla. En el proceso de clasificación utilizan Gaussian Mixture Model (GMM) y Weighted Discrete - K-Nearest Neighbor (WD-KNN).

Finalmente, en (Reyes Vargas, n.d., 162-169) se presenta la creación de una base de datos emocional en idioma español de México que contiene 7 emociones: disgusto, enojo, felicidad, miedo, sorpresa, neutral y tristeza. La base de datos consta de tres conjuntos de datos de voz, de los cuales cada conjunto tiene 40 palabras seleccionadas de la lista Swadesh para español y 40 frases. En la etapa de extracción de características, se extraen 14 características de las muestras de audio: 12 MFCC, frecuencia fundamental F0 y los coeficientes de la energía. Los autores proponen un método donde se construyen y realizan pruebas a un clasificador binario jerárquico para las siete clases de emociones registradas en la base de datos. El resultado de las pruebas dio un margen de error del 33.59%.

3. METODOLOGÍA

En esta sección se describe la metodología propuesta en este trabajo de investigación para realizar el procesamiento de la señal de voz.

3.1 Descripción general de la metodología de solución propuesta

En la figura 1 se presenta la descripción general de la metodología de solución la cual se encuentra dividida en dos secciones. Este artículo se centra, en forma específica, en la fase de extracción de características.

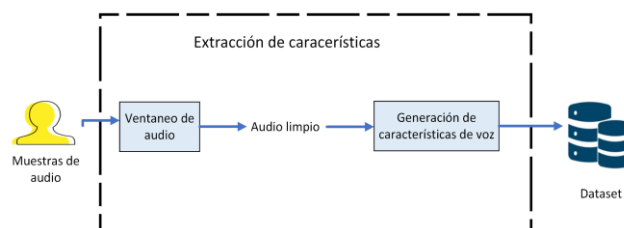


Figura 1 Metodología del procesamiento de la señal de voz

4. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

La obtención de características tiene como objetivo obtener de manera individual una representación en vectores. Cada vector contiene un número fijo de coeficientes que dependerá de la característica analizada. En el análisis de la voz es común el empleo de dos tipos de características: acústicas, las cuales

poseen un sentido físico y determinado; y las características de representación, las cuales se encargan de describir el comportamiento dinámico de la señal y son calculadas a partir de algún método de representación de señales. Para la obtención de características se emplearon técnicas para representar el comportamiento temporal de la señal, obteniendo parámetros referentes a la señal de voz. Las técnicas de extracción empleadas son el raw data y MFCC, ambas realizadas mediante el programa Praat.

La técnica de Raw Data permite trabajar directamente sobre todos los audios en el dominio temporal, es decir, la señal de audio no es llevada a ningún tipo de representación o reducción previa de los parámetros. Los parámetros extraídos fueron Zero Crossing Rate, Energy, Amplitud, Intensidad, Dominio de la frecuencia, Chroma, Harmonics ratio, Frecuencia, Formantes de Frecuencia, Número de puntos, Número de Periodos, Jitter, Shimmer, Pitch.

En esta investigación se utiliza Praat, un programa diseñado para hacer investigaciones en fonética. Este es un programa de libre distribución, de código abierto, multiplataforma y gratuito. Fue desarrollado en la Universidad de Ámsterdam por Paul Boersma y David Weenink a partir del año 1992. Es un software de amplios propósitos; en efecto, permite hacer análisis acústico, síntesis articulatoria, procesamiento estadístico de los datos, edición y manipulación de señales de audio.

En la figura 2 se muestra una señal en la ventana de edición del sistema Praat. La ventana tiene un menú superior (File, Edit, Query, View, Select, Spectrum, Pitch, Intensity, Formant y Pulses). En cada una de las opciones mostradas en la ventana se pueden configurar cada uno de los parámetros, de acuerdo a lo que se requiera,

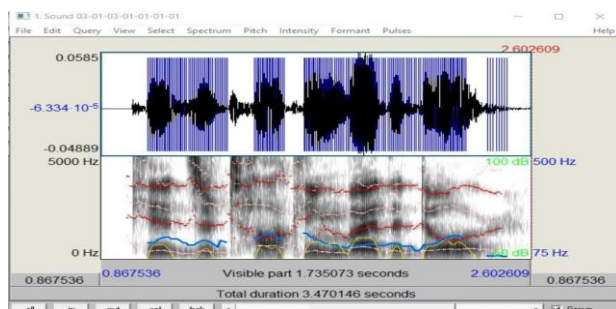


Figura 2 Ejemplo de un análisis de audio en Praat

4.1 Muestras de audio

En esta investigación se analizaron varias bases de datos. La base de datos en español EmoWisconsin fue solicitada al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (contacto: Carlos Alberto Reyes García – kargaxxi@inaoep.mx) se obtuvo respuesta favorable del acceso y se siguen gestionando los documentos requeridos que se solicitaron por parte de la institución que posee la base de datos. En este documento se

presenta el análisis de la extracción de características de la base de datos Emotional Speech and Song (RAVDESS) (Livingstone SR, 2018), la cual se encuentra en el idioma inglés norteamericano y contiene un conjunto dinámico y multimodal de expresiones faciales y vocales. Esta base de datos tiene un tamaño de 1440 archivos, 60 grabaciones por actor por 24 actores (12 hombres y 12 mujeres), que vocalizan dos declaraciones léxicamente similares con un acento norteamericano neutral. Las emociones que manejan son: neutral, calma, Felicidad, tristeza, enojo, miedo, asco y sorpresa. El resumen de esta base de datos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Base de Datos RAVDESS

Dataset	Idioma	Emociones	Obtención	Tamaño
Emotional Speech and Song (RAVDESS)	Inglés	Neutral Tranquilo Feliz, Enojado Triste Temeroso Asco Sorprendido	Actores profesionales que vocalizaron dos declaraciones léxicamente coincidentes con un acento norteamericano neutral.	1440 archivos: 60 ensayos por actor x 24 actores (12 mujeres, 12 hombres)

Cada uno de los registros de la base de datos correspondiente a los audios fue etiquetado de acuerdo a la emoción que cada audio representaba. Las emociones se etiquetaron como positivas o negativas, de acuerdo al tipo de la emoción, por ejemplo, la emoción enojo, se etiquetó como negativa, mientras que la emoción felicidad, se etiquetó como positiva.

En la tabla 2 se pueden visualizar los resultados del etiquetado según el juicio de expertos en el área de psicología.

Tabla 2 Emociones etiquetadas en positivas y negativas

Emoción	Estado de ánimo
Enojo	Negativo
Miedo	Negativo
Felicidad	Positivo
Neutral	Negativo
Asco	Negativo
Calma	Positivo
Tristeza	Negativo
Sorpresa	Positivo

4.1 Ventaneo de un audio

El proceso de Ventaneo de Audio consiste en mostrar gráficamente el archivo de audio con el objetivo de editar el archivo manualmente para adecuar la señal para que pueda ser procesada.

Este proceso se realiza en tres etapas: la primera etapa consiste en realizar cortes a la señal de audio por un rango determinado en milisegundos. La segunda etapa consiste en realizar un

traslape, que mueve cada uno de los cortes por un rango también en milisegundos. La tercera etapa consiste en aplicar funciones de ventaneo para suavizar los cambios que surgen al realizar el corte. La figura 3 muestra el ventaneo en la tercera etapa, en la cual el audio está listo para ser procesado, cabe mencionar que dada la forma en que fueron grabados los audios, estos contienen un mínimo de ruido, por lo que su ventaneo solo consiste en eliminar las partes que están en silencio.

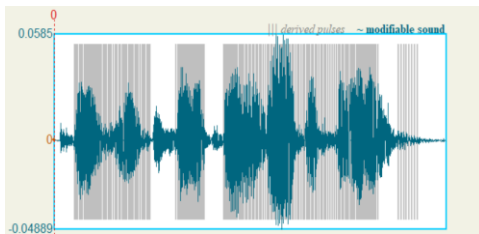


Figura 3 Ventaneo de un audio

Quando una señal de audio es corrupta o tiene ruido, el análisis espectral distribuye los componentes de la señal y el ruido lo elimina. Para este caso, las muestras de audio utilizadas no presentan ninguna anomalía, por ende, el ventaneo que se les realiza solo elimina la parte sin información en el archivo. El resultado de este ventaneo da como resultado un audio en formato WAV el cual se encuentra listo para procesar.

4.2 Generación de características de voz

La generación de características consiste en procesar de manera individual y manual cada archivo de audio para obtener una nueva representación en forma de secuencia de vectores (matriz), uno por segmento. Estos valores se llaman coeficientes o parámetros, para ello se utiliza el software Praat.

Quando se abre un archivo de audio se activa el menú dinámico de Praat Objects y se enumera de acuerdo al orden de su aparición. Para saber los datos básicos de la señal de audio se selecciona la opción Info Sound, en donde se visualiza una nueva ventana con dicha información. Al seleccionar la opción Pulses se puede realizar un análisis del audio más a detalle gracias al reporte de voz que se genera. La información obtenida en la información del audio y reporte de voz comprende el total de las características que se seleccionaron para su extracción.

Como resultado a este proceso se genera un archivo en formato csv (véase figura 4), en el cual se enlistan todas las características obtenidas de cada archivo de audio, ya etiquetadas. Cada emoción tiene un total de 192, excepto neutro la cual solo tiene 96 archivos. Los datos de las 42 variables se encuentran completos, y no existe ningún valor perdido.

[illegible]

Figura 4 Dataset

5. PRUEBAS

Siguiendo el enfoque propuesto se procedió a seleccionar los archivos de audio con el fin de garantizar la validez de la metodología y del proceso planteado. En la figura 5 se puede observar la información básica del audio, la cual menciona desde su nombre hasta la duración del mismo.

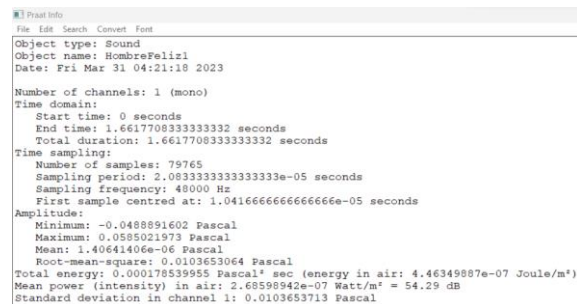


Figura 5 Información del audio

En la figura 6 se puede observar un reporte de voz el cual contiene todos los parámetros mencionados en la sección 2.1. Cabe mencionar que dicha información se presenta en un archivo de texto, y de manera manual es transcrito a una hoja de cálculo como se muestra en la figura 4, en este caso de Excel para poder trabajar de mejor manera con los datos.

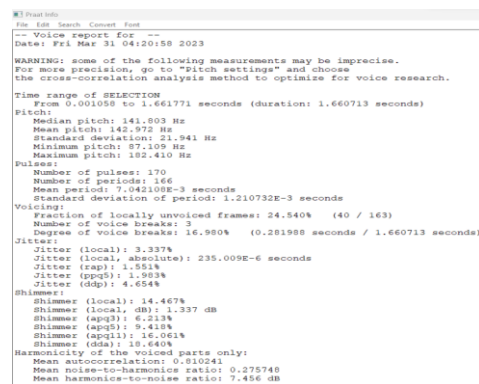


Figura 6 Reporte de voz

5.1 Prueba 1 hombre y mujer feliz

En esta prueba se comparan los resultados de generar las características de un audio sin antes pasar por el proceso de ventaneo

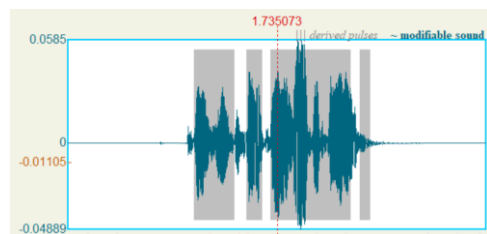


Figura 7 Audio de hombre A feliz sin procesar

En la figura 7 se muestra el audio de un hombre con emoción feliz el cual no ha pasado por la etapa del ventaneo, es decir, no ha sido procesado. Mientras que en la figura 8 se muestra el mismo audio, pero ya procesado. Se puede observar una gran diferencia en cuanto a sus características registradas en la tabla 3.

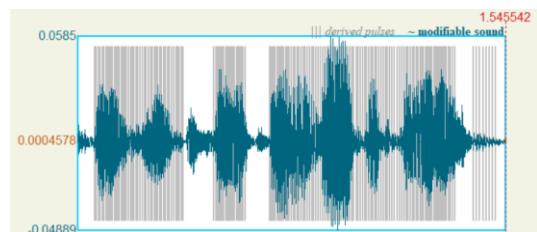


Figura 8 Audio de hombre B feliz ya procesado

De igual forma en la figura 9 se muestra el archivo de audio de una mujer el cual no ha pasado por la etapa del ventaneo y en la figura 10 mostrando el resultado del audio ya procesado.

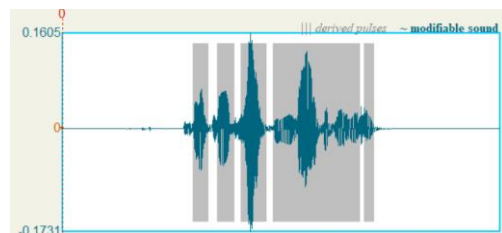


Figura 9 Audio de mujer A feliz sin procesar

Las diferencias más notables son la duración e intensidad. Debido a que se eliminan los silencios al inicio y al final de cada archivo de audio baja considerablemente la duración de cada audio. Por otra parte, la intensidad se incrementa debido a que depende principalmente de la presión sonora y se relaciona en proporción directa al volumen, siendo así que, no toma en cuenta los silencios que contenía el audio original, solo toma considera la voz y dos milisegundos de silencio.

¹ Los datos A son el audio que no paso por la etapa del ventaneo y B que, si fue procesado, en hombre y mujer.

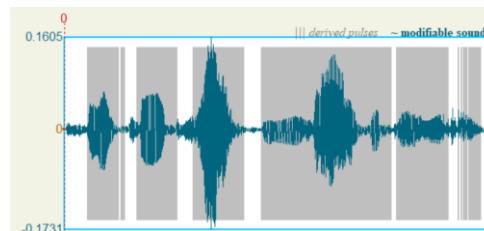


Figura 10 Audio de mujer B feliz ya procesado

Las características mostradas en la tabla 3 fueron seleccionadas tomando en cuenta los parámetros mencionados en la sección 2.1.

Tabla 3 Características de audios sin procesar y ya procesados

Feliz	Hombre A	Hombre B	Mujer A	Mujer B
Duración	3.4701 s	1.5455 s	3.6036 s	1.6022 s
Amplitud	6.885e-07 P	1.439e-06 P	2.3994e-07 P	1.4920e-07 P
Intensidad	20.9510 dB	51.2733 dB	26.42754 dB	54.27529 dB
Jitter	235.04E-6 s	241.85E-6 s	89.080E-6 s	83.827E-6 s
Shimmer	1.338 dB	1.303 dB	1.011 dB	1.061 dB
HNR	7.456 dB	7.313 dB	10.468 dB	10.459 dB
Pitch	142.978 Hz	142.086 Hz	241.771 Hz	249.140 Hz ¹

6. CONCLUSIONES

En esta investigación se logró desarrollar una metodología para la extracción y caracterización de la señal de voz, la cual permite la selección de los parámetros más representativos en la voz.

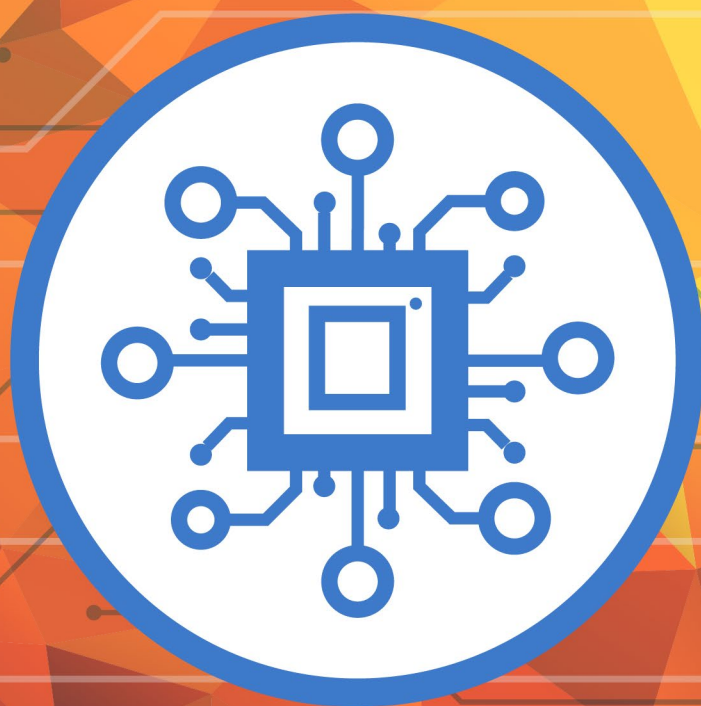
Es importante destacar que la metodología de caracterización que se presenta integra dos técnicas de procesamiento: raw data y MFCC. Los datos crudos contienen información sobre la intensidad, duración y pausas en la voz, los cuales al ser comparados después de ser procesados brindan un nuevo enfoque en la selección de componentes principales.

Al comparar resultados de la investigación se comprueba la importancia de un ventaneo antes de la etapa de generación de características, debido a que esto es de gran utilidad para obtener valores más precisos y confiables de las emociones detectadas.

Como trabajo futuro, continuaremos desarrollando un modelo de detección automática de emociones a través del procesamiento de señales acústicas de la voz.

REFERENCIAS

- Badsha, F. (2020). Emotion Detection by Analyzing Voice Signal Using Wavelet. *American Journal of Computational Mathematics*, 10, 485-502. Obtenido de <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=104596>
- Baena Zuñiga, A., Sandoval Villegas, M. A., Urbina Torres, C., & Helen Juarez, N. (10 de noviembre de 2005). Los trastornos del estado de ánimo. *Revista Digital Universitaria*, 6(11). Obtenido de <http://www.revista.unam.mx/vol.6/num11/art110/art110.htm>
- Boersma, P., & Weenink, D. (s.f.). *Praat: doing Phonetics by Computer*. Recuperado el 30 de March de 2023, de Phonetic Sciences: <http://www.praat.org/>
- Bojanic, M. (2013). Reconocimiento automático de emociones en el habla en lenguaje Serbio. *21st Telecommunications forum TELFOR*, 459-465.
- Cabrelles Sagredo, M. S. (2008). La influencia de las emociones en el sonido de la voz. *Cervantes Virtual*, 130-133. Obtenido de <https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmc8p7t3>
- Echeverry Correa, J. D. (2008). Reconocimiento de emociones en el habla. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 113-130.
- Egger, M. (2019). Emotion Recognition from Physiological Signal Analysis: A Review. *ELSEVIER*, 343, 35-55. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157106611930009X>
- Frederickson, B. L. (s.f.). Cultivating Positive Emotions to Optimize Health and Well-Being. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/235361403_Cultivating_Positive_Emotions_to_Optimize_Health_and_Well-Being
- Iglesias-Hoyos, S., & del Castillo Arreola, A. (s.f.). Reconocimiento facial de expresión emocional: diferencias por licenciaturas. *Acta de Investigación Psicológica*, 6(3). Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=358950159003>
- Martínez Rodríguez, R. (s.f.). Diseño de un sistema de detección y clasificación de cambios emocionales basado en el análisis de señales fisiológicas no intrusivas. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10810/18804>
- Orozco Castaño, E. (s.f.). Detección de estados de ánimo mediante el procesamiento de señales acústicas. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Pérez Espinosa, H. (2011). EmoWisconsin: una base de datos de habla infantil emocional en español mexicano. 62-71.
- Psiquiatría, P. (21 de June de 2021). *La importancia de identificar emociones | Psicología*. Recuperado el 31 de March de 2023, de Escuela de Postgrado de Psicología y Psiquiatría: <https://eepsicologia.com/identificar-emociones/>
- Reyes Vargas, M. (s.f.). Agrupación jerárquica y clasificación de las emociones en el habla humana utilizando matrices de confusión.
- Shah Fahad, M. (2020). A survey of speech emotion recognition in natural environment. *Digital Signal Processing*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/348084016_A_survey_of_speech_emotion_recognition_in_natural_environment
- Tsang-Long, P. (2017). Un estudio sobre la búsqueda de las características del habla más discriminatorias en el reconocimiento de emociones del habla dependiente del hablante. 157-162.
- Zhang, Q. (2017). Respiration-based emotion recognition with deep learning. *Computers in Industry*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/318128719_Respiration-based_emotion_recognition_with_deep_learning



INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Caracterización de una celda biofotovoltaica de pasto bermuda (*Cynodon dactylon* L. Pers) con variación de tamaño de celda

Salgado-Gutiérrez M.C. * Pérez-García G.F. *
Fragoso-Mandujano J.A. * Ríos Zúñiga G.A. *
Ortiz y Ojeda P.T. *

** Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez. Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050, Apartado Postal: 599, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México*

Abstract: La investigación se centra en la caracterización de una celda biofotovoltaica utilizando pasto bermuda (*Cynodon dactylon* L. Pers) como fuente de energía. El objetivo principal es estudiar cómo la variación en el tamaño de la celda afecta la eficiencia y producción de energía eléctrica de la celda biofotovoltaica. Para llevar a cabo el estudio, se cultivó pasto bermuda en una solución de nutrientes y se utilizó como material para la celda biofotovoltaica. Los resultados indican que el tamaño de la celda es un factor en la eficiencia de la celda biofotovoltaica. Esto sugiere que una mayor eficiencia se puede lograr mediante el diseño de celdas más grandes. Estos hallazgos pueden tener implicaciones importantes en el desarrollo de tecnologías de energía renovable basadas en la fotosíntesis.

Keywords: Biofotovoltaica, pasto bermuda, cosecha de energía, energía renovable.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de la revolución industrial la explotación de fuentes de energía no renovables ha ido en aumento en consecuencia investigadores al rededor del mundo exploran el desarrollo de tecnologías energéticas que dependan de recursos renovables. Una alternativa prometedora son las celdas biofotovoltaicas (BPV), que aprovechan el proceso natural de la fotosíntesis en plantas y la actividad metabólica de microorganismos heterótrofos en la rizosfera de la planta para producir electricidad (Zhu et al., 2023). Esencialmente, el proceso implica la liberación de materia orgánica de las raíces de la planta, que luego se oxida por los microorganismos del suelo para producir CO₂, protones y electrones. Los electrones son capturados por el ánodo (una membrana de cobre), mientras que el cátodo (una membrana de zinc) reduce el oxígeno a agua, produciendo energía eléctrica (Strik et al., 2011).

El pasto bermuda (*Cynodon dactylon* L. Pers) es una especie vegetal para estudiar el rendimiento de las celdas BPV. Esta gramínea de estación cálida se propaga típicamente a partir de semillas y tiene un hábito de crecimiento rizomatoso, con tallos subterráneos que se asemejan a raíces. Su sistema radicular primario se origina a partir de la semilla y dura solo unas pocas semanas después de la germinación, mientras que el sistema radicular secundario está formado por raíces adventicias que anclan la planta al suelo y absorben agua. Para

obtener mejores resultados, el pasto bermuda prefiere suelos franco-arenosos o de textura media

2. OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es evaluar el impacto del pasto bermuda en la producción eléctrica de las celdas BPV. Específicamente, buscamos medir el voltaje generado por celdas de diferentes tamaños y determinar cómo esto se relaciona con el crecimiento y la actividad metabólica del pasto. Al comprender mejor la relación entre las plantas y la tecnología biofotovoltaica, y a futuro desarrollar fuentes de energía eficientes y sostenibles.

3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN / MATERIALES Y MÉTODOS

Para el cátodo se usó malla criba de zinc galvanizada de 6x6 mm, se realizaron los cortes necesarios para adecuarlo a los tres tamaños de recipientes (macetas), se esquematiza en la Figura 1, para el ánodo se usó cable de cobre calibre 12 de varios hilos para formar una malla similar a la del cátodo.

A las macetas se les perforó agujeros a los costados que permitieran la salida de las terminales del cátodo y ánodo Figura 2. Para evitar la acumulación de agua en la celda se perforó la base de las macetas.

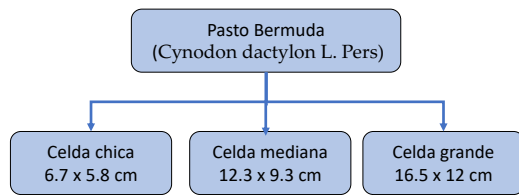


Fig. 1. Diagrama de tamaños de celdas

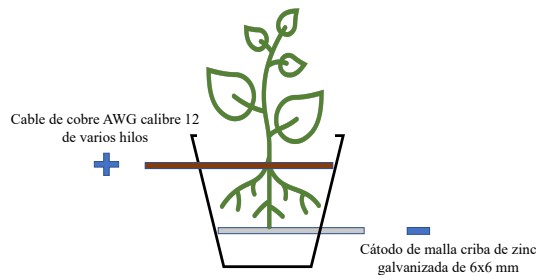


Fig. 2. Representación de la estructura de la celda BPV

La primera capa de suelo agregada por tamaño de maceta fue de 20, 50 y 120 g según el tamaño de la celda, posteriormente se colocó el cátodo y se recubrió con una segunda capa de suelo de 10, 25 y 50 g, luego se colocó el ánodo que fue cubierto por la tercera capa de suelo de las mismas proporciones que la segunda. Para poder realizar la medición de los voltajes generados por las celdas, fue necesario agregar conexiones externas al ánodo y cátodo utilizando el mismo material con el que fueron construidos los electrodos. Se realizó medición de voltaje con carga variable de 0 a 1 k Ω (Figura 4) y sin carga (Figura 5).



Fig. 3. Banco experimental

Para determinar cuál de las tres celdas tiene una mayor capacidad de generación de energía, se empleó el parámetro de regularización de la fuente de voltaje el cual mide la capacidad de la celda para suministrar la cantidad necesaria de corriente al circuito que está alimentando. Este factor importante se describe en detalle en la Ecuación 2 (Castillo et al., 2011).

$$RV = \frac{V_{S\text{Sincarga}} - V_{S\text{plenacarga}}}{V_{S\text{Sincarga}}} \quad (1)$$

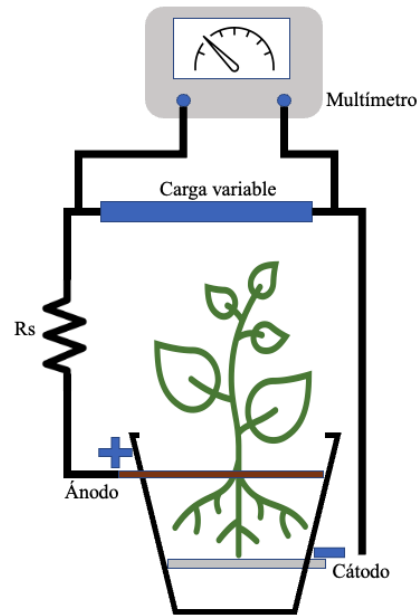


Fig. 4. Esquema de montaje del circuito para la medición con carga

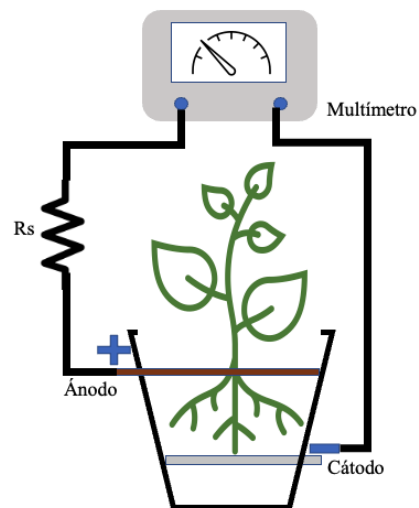


Fig. 5. Esquema de montaje del circuito para la medición sin carga

El resultado de la ecuación 2 es un valor porcentual que indica la calidad de la regularización de voltaje de la celda. Un valor más bajo en este factor indica una mejor regularización de carga.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de voltaje sin carga obtenidos. El análisis de varianza reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los factores evaluados en cuanto al tamaño de la celda se refiere. En particular, se observó que los tratamientos con Pasto-Grande generaron un voltaje cercano a 1.03 V.

Table 1. Generación de voltaje sin carga.

Tamaño de celda	Voltaje generado (V)
Pasto-Chico	0.976 ± 0.016
Pasto-Mediano	1.017 ± 0.002
Pasto-Grande	1.022 ± 0.004

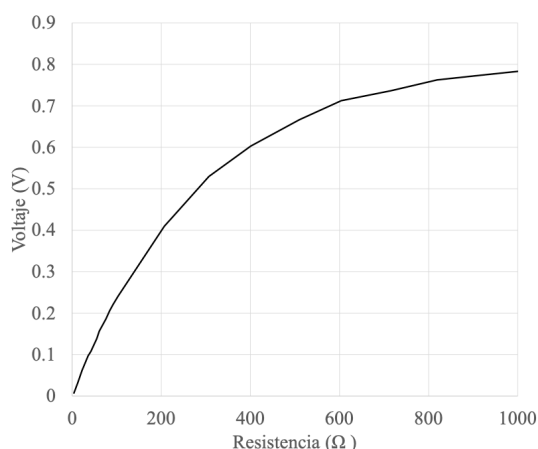


Fig. 6. Mediciones de resistencia y voltaje en un circuito con carga

En la Figura 6 se aprecia el comportamiento de las mediciones de voltaje con variación de resistencia, se aprecia que a 1 kΩ se obtiene una medición de 0.783 V.

Con los valores de voltaje en el circuito sin carga y a plena carga se calculó el porcentaje de regularización para la celda grande.

$$RV = \frac{1.022 \text{ V} - 0.783 \text{ V}}{0.783 \text{ V}} * 100\% = 30.30\% \quad (2)$$

4. CONCLUSIONES

En base al porcentaje de regularización obtenido en las celdas representativas, se concluye que la celda que contiene la planta de pasto con celda grande es adecuada para la construcción de un prototipo de generación de energía biofotovoltaica. Esto se debe a que dicha celda presenta una mayor estabilidad ante la variación de resistencia en la carga conectada, además de proporcionar el voltaje más alto cuando se realiza una medición sin carga directamente de los electrodos. Es importante mencionar que esta planta resultó significativa según el análisis estadístico realizado.

5. ALCANCES Y TRABAJOS FUTUROS

Para continuar con nuestra investigación, se sugiere que los investigadores realicen conexiones en serie y paralelo con la planta seleccionada para amplificar tanto el voltaje como la corriente generados. Esto permitiría obtener una

mayor cantidad de energía eléctrica a partir de la planta. Cabe destacar que aún hay un campo abundante por explorar en lo que se refiere a la generación de energía sostenible.

REFERENCES

- Castillo, M.M.M., Oliveros, J.J.O., Ramirez, B.M.R., and Arias, M.G. (2011). Validación numérica y experimental de un algoritmo de identificación de fuentes bioeléctricas tipo dipolo. In *Quinta Gran Semana Nacional de la Matemática.*, 177. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Strik, D.P., Timmers, R.A., Helder, M., Steinbusch, K.J., Hamelers, H.V., and Buisman, C.J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in biotechnology*, 29(1), 41–49.
- Zhu, H., Wang, H., Zhang, Y., and Li, Y. (2023). Biophotovoltaics: Recent advances and perspectives. *Biotechnology Advances*, 108101.

COSECHA DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA CON TRANSMISIÓN DE POTENCIA INALÁMBRICA

Deyanira González Aguilar*. Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino**
Dr. Mario Ponce Silva***

* Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico; m22ce082@cenidet.tecnm.mx).

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (e-mail: victor.op@cenidet.tecnm.mx)

*** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (e-mail: Mario.ps@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The present work relates piezoelectric energy harvesting with wireless power transmission. The combination of these two technologies can enable energy harvesting from mechanical pressure and wireless transmission of the generated power. In practice, this could involve installing piezoelectric sensors or devices in a given area, such as a bridge or a busy road, which would be responsible for harvesting the energy generated from mechanical pressure. This energy would then be transmitted wirelessly to a storage or usage device, such as a battery or lighting system. Implementing this in power electronics has the potential to be an innovative and sustainable way to generate energy through energy conditioning and storage.

Keywords: cosecha energía (EH), convertidor resonante, transmisión potencia inalámbrica (TPI), acoplamiento inductivo y capacitivo,

1. INTRODUCCION

El campo de la cosecha de energía (EH) ha experimentado un significativo desarrollo en los últimos años debido a la tendencia de producir aparatos electrónicos portátiles e inalámbricos con una vida útil prolongada. Existen varias fuentes de energía ambiental cosechable, como la energía térmica, solar, mecánica y de radiofrecuencia [1]. La recolección de energía mecánica permite convertir las actividades humanas en energía eléctrica, ejemplo de ella es la vibración siendo la forma más nueva de cosecha de energía mecánica como el movimiento humano. En este caso se pueden utilizar diferentes tipos de convertidores electrostáticos, electromagnéticos y piezoeléctricos [2].

1.1 Cosecha de energía piezoeléctrica

La recolección piezoeléctrica se divide en cuatro bloques principales: vibración de entrada, transductor piezoeléctrico, acondicionamiento y almacenamiento de energía, y la carga [3]. Para lograr una máxima transferencia de energía conlleva trabajar en la condición de resonancia, y para ello se realiza la revisión de topologías de convertidores para trabajar en la frecuencia de resonancia [4].

1.2 Transmisión de potencia inalámbrica

La transmisión de potencia inalámbrica (TPI) permite suministrar energía eléctrica a un dispositivo receptor sin ninguna conexión galvánica como un cable. Esto consiste en dos lados separados por un medio. La transmisión de potencia inalámbrica puede ser mediante acoplamiento capacitivo, inductivo y el acoplamiento magnético resonante [5]. Trabajar

con un convertidor resonante implica altos valores de frecuencia en el elemento primario de la transmisión de potencia inalámbrica, y se lleva a cabo mediante un acoplamiento como se muestra en la Figura 1.

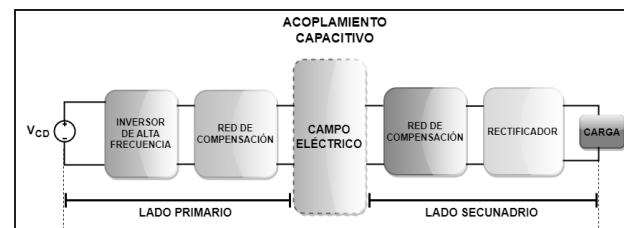


Fig. 1. Esquema básico para la transmisión de potencia inalámbrica capacitiva.

1.3 Propuesta de solución

Transformar el movimiento mecánico por la vibración mediante pisadas humanas genera energía eléctrica. Para el suministro de energía a dispositivos de bajo consumo se requiere de un sistema de transducción piezoeléctrica utilizando un convertidor que trabaje con altas frecuencias de resonancia, disminuyendo así el volumen de componentes en el convertidor resonante de CD-CD a utilizar acoplado a la tecnología de transmisión de potencia inalámbrica. Tener en cuenta las siguientes especificaciones para la alternativa de solución del diseño requerido. Circuito resonante: Topología que entregue una potencia de 0 a 10 W. Reducción del circuito convertidor resonante. Inversor: Inversor adecuado reducido en componentes. Frecuencia de operación máxima de 200kHz. Operación eficiente de la red resonante.

2. ESTUDIO CON ACOPLAMIENTO INDUCTIVO

2.1 Caso de estudio con acoplamiento inductivo

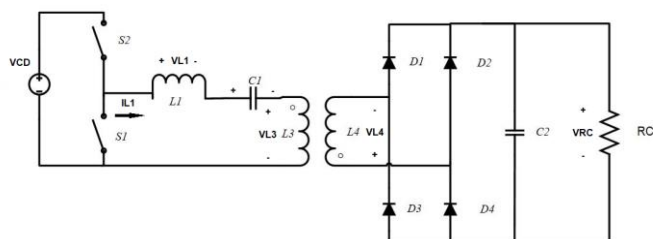


Fig. 2. Esquema básico del circuito resonante con acoplamiento inductivo.

2.2 Simulación en el programa PSPICE

Para la simulación del circuito en PSPICE, se declaran características para el perfil de simulación del mismo: Tipo de análisis: Time domain (transient). General Settings: Run to time: 2ms, Start saving data after: 0, Maximum Step size: 0.01us.

3. PARÁMETROS DEL CIRCUITO RESONANTE

El circuito resonante LLC tiene asociado ciertas ecuaciones para realizar el cálculo de los componentes del mismo.

Tabla 1 Especificaciones y valores de los componentes del circuito resonante.

Variable	Símbolo	Valor	Parámetros	Valor
Condición de resonancia	ω	$\omega = \omega_0$	L1	1.93μH
Potencia	P	20W	L3	2.74mH
Voltaje de alimentación	VCD	12V	L4	53.6mH
Frecuencia	f	500kHz	C1	52.36nF
Voltaje de salida	VR	24V	C2	612.24nF
Factor de calidad	Q	5	RC	32.67Ω

4. RESULTADOS PRELIMINARES DE LA SIMULACIÓN

De acuerdo a las simulaciones se muestran a continuación los resultados obtenidos, estos corroboran los datos colocados en la tabla de especificaciones y cálculos.

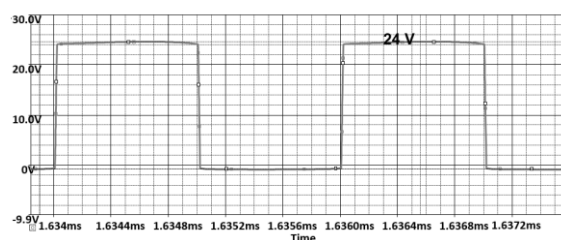


Fig. 3. Forma de onda del voltaje en el devanado secundario (VL4).

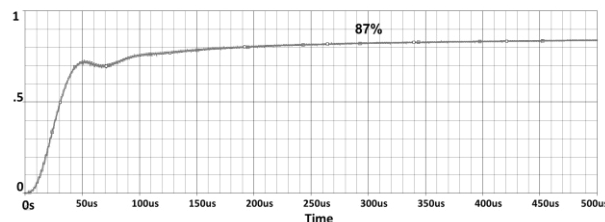


Fig. 4. Gráfica de la eficiencia del circuito resonante(η).

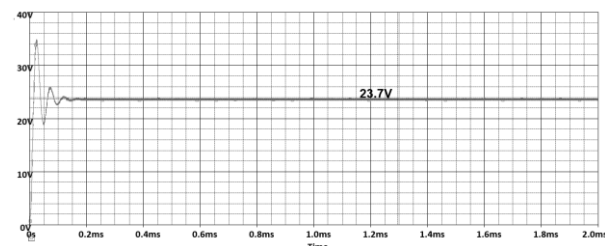


Fig. 5. Gráfica del voltaje en la salida (VRC).

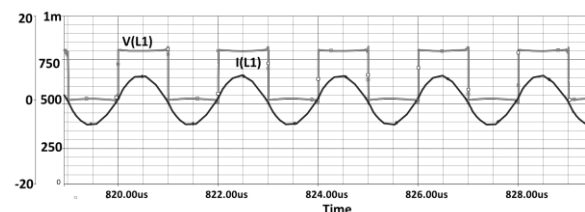


Fig. 6. Forma de onda de la corriente (IL1) y el voltaje (VL1) en resonancia.

5. CONCLUSIONES

La captación de energía es una de las técnicas más prometedoras, entre ellas la transducción piezoeléctrica mediante el movimiento humano y se puede llevar a cabo con la transmisión de potencia inalámbrica capacitiva o inductiva, ejemplo es el estudio con acoplamiento inductivo utilizando una red de circuito resonante con transformador como el aquí estudiado. Los resultados indicaron que la metodología de diseño es correcta y es posible alcanzar una eficiencia mayor del 85%.

REFERENCIAS

- [1] S. Vázquez-Valdés, R. Juárez-Aguirre, and F. López-Huerta, "Rectifiers for energy harvesting in application wearable devices," Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, vol. No.52, 2021.
- [2] N. F. N. Daud and R. Ghoni, "VIBRATION ENERGY HARVESTING TECHNIQUE: A COMPREHENSIVE REVIEW," Engineering Heritage Journal, vol. 4, no. 2, pp. 46-48, 2020/10/30 2020, doi: 10.26480/gwk.02.2020.46.48.
- [3] N. Samal, O. J. Shiney, and A. Patra, "Study of Piezoelectric transducers used for Energy Harvesting Applications," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1085, no. 1, p. 012031, 2021/02/01 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1085/1/012031.
- [4] "A Novel Technique of Piezoelectric Energy Harvesting," International Journal of Recent Technology and Engineering, vol. 8, no. 6S, pp. 20-24, 2020/03/18 2020, doi: 10.35940/ijrte.f1004.0386s20.
- [5] C. Lecluyse, B. Minnaert, and M. Kleemann, "A Review of the Current State of Technology of Capacitive Wireless Power Transfer," Energies, vol. 14, no. 18, p. 5862, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5862>.

Diseño de una HMI basada en un equipo KINCO para el control de variables de proceso industriales

J. Guzmán, *E. Sánchez, G. Milian, A. Ortiz, I. Velázquez, & B. Villaseca.

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Av. Universidad No.350,
Carretera Federal Cuitláhuac-La Tinaja, Localidad Dos Caminos C.P. 94910
Cuitláhuac, Veracruz. (correo electrónico: eduardo.sanchez@utcv.edu.mx)

Resumen: Las HMI's (Human Machine Interface) han tomado gran importancia en la industria moderna, ya que permiten la interacción entre humanos y máquinas en entornos de producción. Estos dispositivos son capaces de presentar información relevante de forma comprensible para el usuario, lo que ayuda a los operadores a tomar decisiones informadas y responder rápidamente a situaciones críticas. Además, las HMI's pueden ser personalizadas y adaptadas a las necesidades específicas de la industria y los procesos de producción. En el artículo se presentan los resultados de la implementación de una HMI marca KINCO dentro de un sistema automatizado multivariable en un ambiente industrial con el objetivo de optimizar los procesos, priorizando la seguridad del personal y el cuidado ambiental.

Palabras clave: Interfaz hombre maquina, Supervisión, Monitoreo, Procesos, Seguridad.

1. INTRODUCCIÓN

HMI (Human Machine Interface) es una tecnología clave en la industria moderna, se utiliza para permitir la interacción entre los seres humanos y las máquinas en un entorno de producción. Los HMI's permiten a los operadores supervisar y controlar procesos industriales complejos, lo que puede mejorar la eficiencia, la seguridad y la calidad de los productos fabricados. La relevancia de las HMI se encuentra en su habilidad de mostrar información importante de una manera que sea fácilmente comprensible para el usuario. Esto ayuda a los operadores a tomar decisiones informadas y a responder rápidamente a situaciones críticas en la planta de producción. Además, los HMI's pueden ser personalizados y adaptados a las necesidades específicas de la industria y los procesos de producción, lo que los hace extremadamente versátiles. En la actualidad, las industrias dedicadas a la producción, es común observar que cualquier proceso realizado depende del manejo de cierto número de variables a través de un sistema de control que, engloba tanto la instrumentación como el trabajo del actuador en cuestión y también de forma automática. Sin embargo, teniendo incluso un sistema automatizado en su totalidad, se presenta la necesidad de monitorear el funcionamiento del sistema y el estado de las variables tratadas, para así dar seguimiento al funcionamiento del proceso. Es por ello que se requiere de una herramienta que proporcione al operador el acceso a la información útil del sistema, priorizando la comprensión de los elementos mostrados al usuario, evitando de esta forma cualquier tipo de error producido por el factor humano al tener que interpretar directamente el sistema. Se ha demostrado la eficiencia de estos dispositivos en distintos proyectos de automatización para diferentes plantas o sistemas.

Las HMI'S muestran una alta gama de aplicaciones industriales, por ejemplo, en (E. Mendoza, et al., 2021), que al ser

implementada dentro de un sistema multiagente para una planta purificadora de agua, donde se evaluó el tiempo de respuesta y el comportamiento dinámico del dispositivo requerido para el proceso. De esta manera se puede determinar que una HMI es una herramienta indispensable en la industria moderna, ya que proporciona una interfaz intuitiva y eficiente para controlar y monitorear procesos industriales complejos. Al utilizar esta tecnología, las empresas pueden mejorar la productividad, la seguridad y la calidad de sus productos, lo que a su vez puede aumentar la rentabilidad y la competitividad en el mercado.

1.1 Organización del documento

El presente documento se encuentra organizado mediante secciones con la finalidad de mostrar los resultados del diseño e implementación de la HMI, en el desarrollo se abordará el diseño de cada una de las pantallas, desde un menú de inicio hasta los apartados en donde se modifican las variables, incluyendo configuraciones de usuario como la selección de idioma y un manual guía para el manejo correcto del sistema. Las pruebas de validación del sistema se presentarán empleando un PLC (Controlador Lógico Programable), así exponiendo los resultados en las últimas secciones detallando todo aquello que se ha obtenido tras la creación de dicho HMI, finalmente en las conclusiones se aborda la importancia del trabajo, alcances futuros y aplicaciones.

2. OBJETO DE ESTUDIO

2.1 Delimitación del objeto de estudio

En el presente artículo se tendrá como principal objeto de estudio, la implementación de una HMI marca KINCO GL070E

dentro de un sistema automatizado multivariable, desarrollado el prototipo capaz de implementarse en un ambiente industrial, todo ello con el fin de optimizar los procesos, dar una mayor capacidad al sistema de ser manejado por un operador, priorizando la seguridad del personal, del equipo utilizado, así como también del cuidado ambiental. El sistema es capaz de controlar diversas tareas propias de los procesos industriales, dentro de un procedimiento de trabajo que maneje el uso de distintas áreas a través de un panel de control y un sistema de seguridad para los distintos rangos del personal existentes en la organización. Dentro del panel de control, se dará seguimiento a las variables de temperatura, nivel y velocidad.

- Temperatura: Sistema de temperatura, destinado a su implementación en la industria como parte del control del estado de sustancias (tanto para envasado como para uso de materia prima dentro de un determinado proceso a partir de su temperatura idónea).
- Nivel: Sistema de nivel, cuyo funcionamiento se basa en un sistema de lazo cerrado de segundo orden, que cuenta con un Setpoint establecido como el valor deseado para el nivel de líquido dentro de un contenedor. Este proceso se basa en las mediciones realizadas por un sensor donde se detecta el error (definido como la diferencia entre la señal de entrada y la retroalimentación), que será ingresado al controlador y procesado para determinar la salida con el valor requerido para el actuador.
- Velocidad: Sistema de velocidad, encargado del control de la rotación de un motor que forma parte de una transmisión por cadena, la cual es controlada a través de un encoder responsable de la obtención de información relacionada con la posición y velocidad del sistema a través de un eje asociado.

2.2 Antecedentes

El objeto de estudio ha sido abordado anteriormente en distintos proyectos, de los cuales se retomaron elementos propios del desarrollo general del panel de control, para la implementación de este proyecto, al contexto particular del sistema de control multivariable. A continuación, se citan distintos artículos de interés para el tema: (Sánchez, et al., 2022); en este artículo, se presenta una revisión sistemática de la literatura existente sobre el uso de interfaces hombre-máquina (HMI, por sus siglas en inglés) en la industria manufacturera. El estudio se enfoca en identificar las principales tendencias, desafíos y oportunidades que existen en el uso de estas interfaces en la industria. Así mismo, en (Kuo, M., & Ergen, E., 2019) se presenta un enfoque en la aplicación de las interfaces hombre-máquina en el control de procesos. En el trabajo se discute acerca de como las HMI 's pueden ser utilizadas para monitorear y controlar sistemas

complejos en una amplia variedad de industrias, incluyendo la energía, la química y la manufactura. Por otra parte, en (Wright, P., 2017) se muestran los fundamentales de las interfaces hombre-máquina (HMI's) y los controladores lógicos programables (PLC's), dos componentes críticos de los sistemas de automatización industrial. Además, el trabajo ofrece una visión global del papel que desempeñan las HMI y los PLC en los sistemas de control industrial, así mismo, se analiza cómo pueden integrarse estos dos componentes para crear sistemas eficientes en torno al control de procesos. Finalmente, en (Kumar, P, & Kumar, M., 2018) se aborda el uso de un PLC en conjunto de una HMI, lo anterior, para la automatización del control de un sistema eléctrico, en favor de la optimización del consumo de recursos que supone el uso no moderado del sistema.

3. DESARROLLO

Para el desarrollo del presente proyecto se hizo uso de una HMI KINCO, considerando las especificaciones económicas y de compatibilidad con el controlador al cual será implementado. Es por ello que, el desarrollo y programación fue realizado mediante el *software* de diseño de la misma marca, KINCO DTOOLS.

3.1 Interacción de sistema

Se tomó como base el diagrama que se presenta en la Fig.1, para el análisis del flujo descrito por la información del sistema, que llegará al final de su recorrido a la HMI.

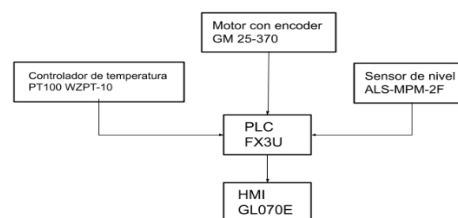


Fig.1 Diagrama de interacción del sistema

Toda la información recibida por el HMI, es procesada por el PLC, el intercambio de datos entre ambos equipos es mediante comunicación serie.

3.1 Pantallas de acceso y selección de idioma

Al dar inicio con la planeación del diseño, se planteó el ofrecer una medida de protección ante posibles intervenciones sobre el sistema, se decidió el presentar dos modalidades de acceso al sistema, de forma que, dependiendo al nivel de control que se decidiese dar al posible operador, será la forma en la que este ingresará a la información presente dentro de la HMI, de esta forma, se estableció como inicio del sistema, la selección de acceso como superusuario o usuario común, solicitando en primera instancia al usuario, una clave de acceso para ingresar como un superusuario. Este funcionamiento puede lograrse de

distintas formas debido a la flexibilidad de programación de las interfaces por medio de software KINCO DTOOLS, pero en el caso particular del presente proyecto, se desarrolló el algoritmo de funcionamiento mostrado en (Fig. 2)

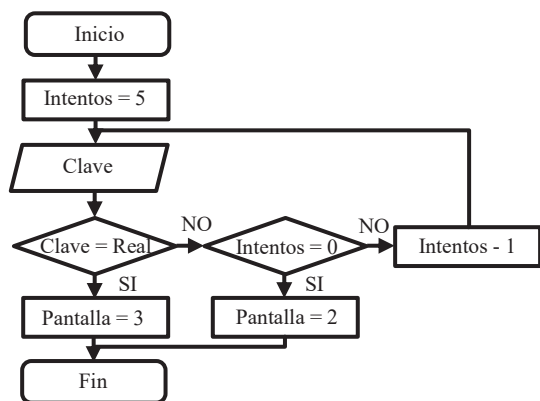


Fig.2 Programación de clave de acceso

Se describe específicamente a través de un diagrama de flujo, el programa utilizado para el funcionamiento de la clave de acceso para la modalidad de superusuario, siendo agregado un límite de intentos dados para el acceso. Se identifica a la variable Pantalla actual como un dato utilizado por el HMI para ingresar a la pantalla del número ingresado. En el caso particular, se denomina pantalla 3 al *frame* de carga de programa, como resultado de haber ingresado la clave correcta, mientras que, en el caso de superarse el número de intentos permitidos, se iniciará el *frame* de alarma, donde se requerirá del ingreso de una segunda clave de mayor seguridad. Como agregado a la parte de inicio del sistema, además de contar con el sistema de seguridad, se diseñó una opción de selección de idioma, teniendo disponible Español e Inglés dentro de esta misma (Fig. 3)

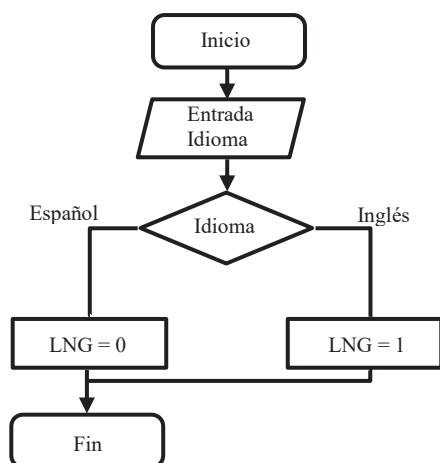


Fig.3 Programación de idiomas

Donde la entrada se asignó a dos elementos tipo *Bit State Setting*, que representan la selección entre los dos idiomas, y que al ser presionados llevarán a la pantalla de acceso. A su vez, se

identifica a la variable LNG, como una variable global presente en cada *frame* de la HMI, la cual condiciona el tipo de texto mostrado dependiendo del idioma, siendo 0 el valor correspondiente al español, y 1 el de inglés.

3.2 Interfaz control de temperatura

Para el diseño de la interfaz de HMI se utilizó el componente de atributo *Trend graph* para establecer en él una gráfica que muestra las variaciones de la magnitud de temperatura que hay en la hora actual, y al mismo tiempo se guarda un registro en un lapso de tiempo para el caso de consultar algún dato que ha sido medido de manera previa. De igual forma se utilizó y configuró un componente de atributo *Bit state* para poder configurar el ajuste de set point únicamente con 3 opciones para el modo de usuario, al mismo tiempo se utilizaron etiquetas en forma representativa para mostrar en qué modo de usuario se encuentra actualmente. Para el caso de súper usuario, se utilizaron los mismos componentes de atributo para realizar la gráfica configurada de la misma manera mostrando un registro de la hora y temperatura que sea detectada desde el inicio del sistema, y en este caso de ser un súper usuario tiene las opciones para poder cambiar la unidad de medida de Celsius a Fahrenheit y Kelvin, la cual es mostrada en un componente *Function key* y es posible de realizar el ajuste set point utilizando un componente de tipo *Number component*, en el cual se puede escribir el número que el usuario desee para establecerlo previamente.

3.3 Interfaz control de nivel

Dentro de este *frame*, se incluyeron elementos que permiten al usuario observar y controlar el proceso de llenado de dos contenedores, representados a través de dos elementos tipo *Bar Graph* modificados para representar gráficamente los tanques establecidos físicamente en la planta. Adicionalmente, se agregaron dos *Number component* para mostrar el valor de contenido de los tanques, obtenido del PLC a través de la memoria DW8. Es en este punto que se aclara que, el valor mostrado para el tanque 2, se deriva del obtenido para el tanque uno, donde se debe establecer la suma del total de líquido presente en ambos tanques, siendo 8 litros el valor por defecto. Además, se incluyó la opción de establecer la unidad de medida manejada por los *Number component*, teniendo disponibles litros y mililitros en la selección. Estos elementos se encuentran presentes para ambas modalidades de acceso, por lo que a continuación se describe el diseño particular dado a cada *frame*. Dentro de la pantalla correspondiente al usuario, además de los elementos antes mencionados, se dispone de un control manual del encendido de la bomba, utilizando dos elementos *Bit State Setting* que afectan a las entradas de PLC X4 (encendido) y X5 (apagado). Por parte del *frame* de súper usuario, se tiene presente la opción para el ajuste del límite de vaciado en tanque 1, a través de un *Number component* dirigido a la memoria DW10 del PLC. Es dentro de esta pantalla que se realiza la configuración de unidades de medida, utilizando dos *Bit State Setting* para la selección.

3.4 Interfaz control de velocidad

Se desarrolló un frame que representa gráficamente la posición de un objeto en relación con la señal cuadrática del encoder, utilizando un arreglo de elementos Bitmap para indicar la posición actual del objeto sobre la banda. La banda se representa con dos componentes GIF animados, que giran en sentido horario o antihorario según la dirección detectada. Para el usuario, se agregaron 4 opciones predefinidas en centímetros de longitud sobre la banda, representadas por componentes Bit state, y para el súper usuario, se agregaron cuatro Number Component que permiten configurar la posición de las opciones de la banda. Este frame demuestra una representación visual efectiva y un control adecuado para el movimiento de objetos en la banda.

4. RESULTADOS

4.1 Frames principales de HMI.

En la Fig. 4 se observa el diseño final para el *frame* de selección de usuario, con la opción agregada para ingresar a la opción de selección de idiomas.

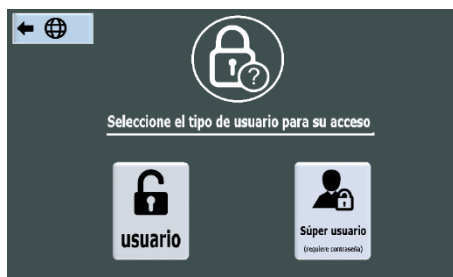


Fig.4 Pantalla de selección de usuario

La Fig.5 presenta la pantalla posterior a la selección de súper usuario, dedicada al ingreso de la clave de acceso. Se tiene como elemento principal, un espacio que, al ser presionado, despliega un teclado numérico para que de esta forma sea ingresada la clave. Además, se dispone de la opción de retorno a la pantalla de selección.



Fig.5 Pantalla de contraseña

En la Fig.6 se observa el *frame* designado como menú de inicio, al cual se accede posterior a la selección de usuario. A través de esta pantalla se puede llegar a las demás, mediante el conjunto

de elementos implementados como accesos directos. Se dispone de una opción que cambia con base al tipo de usuario elegido, ofreciendo para el súper usuario, el cierre de sesión.



Fig.6 Menú principal

En la Fig.7 a) y b) se aprecian las pantallas de control para el sistema de temperatura con SCADA y cambio de unidades. Mediante esta pantalla se controla la temperatura con la opción de tres escalas, de esta manera también hay un selector para establecer el set-point el cual puede ser introducido por el usuario. Así mismo aparece un elemento gráfico que se encarga de mostrar la tendencia de la magnitud de temperatura, cada punto se establece por ciclos de 1 s.

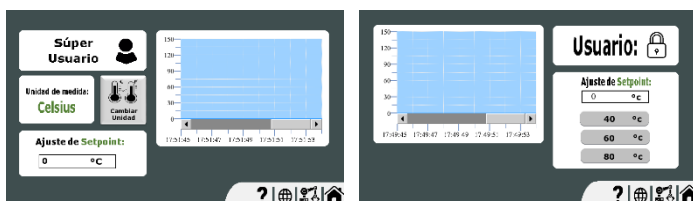


Fig.7 Comparación de usuarios. Variable temperatura
a) Súper usuario temperatura b) Usuario temperatura

En las imágenes que aparecen en las Fig.8 a) y b) se presenta el diseño de *frames* para usuario y súper usuario en sistema de control de nivel, con representación gráfica de tanques. Así

mismo, se dispone de dos controles digitales designados al encendido manual de la bomba. Es en el súper usuario que se dispone la configuración del límite de vaciado para el tanque principal. Adicional a esto, se presenta la selección de tipo de unidad para visualizar la variable de nivel en tanques.

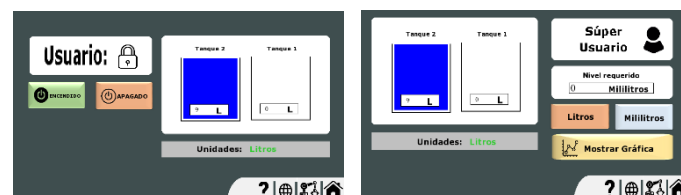


Fig.8 Comparación de usuarios. Variable nivel
a) Súper usuario nivel b) Usuario nivel

En las Fig.9 a) y b) se presentan los *frames* para el sistema de control de velocidad para usuario y súper usuario. Como elemento principal, se observa un conjunto de componentes gráficos dirigidos a la representación visual de la banda, teniendo elementos que indican de forma individual la posición de un punto de referencia, con respecto a las posiciones preestablecidas por el súper usuario. Además de contar con la escala para la mejora de precisión en la visualización.

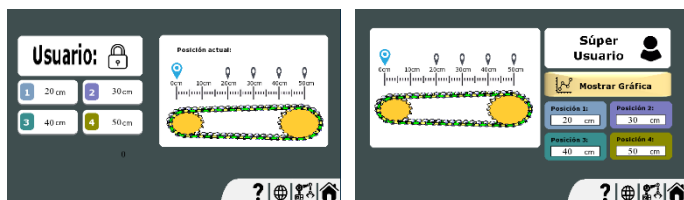


Fig.9 Comparación de usuarios. Variable velocidad
a) Súper usuario velocidad b) Usuario velocidad

4.2 Entradas y salidas de HMI

En este apartado se detallan las distintas entradas y salidas compartidas por el controlador y el HMI, conformando así las memorias análoga y digital. Ambas memorias permiten la interacción con las variables vistas en los procesos y el control de los actuadores.

Tabla 1. Entradas y salidas del sistema

Cantidad de entradas y salidas del sistema	
Entradas	7
Salidas	3

De la Tabla 1, cabe rescatar que se definieron una salida y cuatro entradas analógicas y en cuanto a las digitales se registraron tres entradas y dos salidas, estas mismas ayudan a capturar los datos que se muestran de forma gráfica en las distintas pantallas del HMI.

4.3 Pruebas en cada sistema

El objetivo del presente estudio fue analizar el comportamiento del nivel de un tanque principal en una planta, mediante la implementación de un sistema de control automático. En las gráficas Fig.10, se presenta el aumento de nivel descrito por el tanque principal, que fue monitoreado a través de la entrada del sensor de nivel al PLC. Se debe considerar que, según el procesamiento de la señal del sensor, se registró un aumento en el nivel por cada 1300 ml como razón de cambio. Los resultados obtenidos muestran una respuesta satisfactoria del sistema de control, al mantener el nivel del tanque dentro de los límites deseados. Esto demuestra la eficacia del sistema implementado

en la planta u capacidad para mantener el proceso de manera automatizada y controlada.

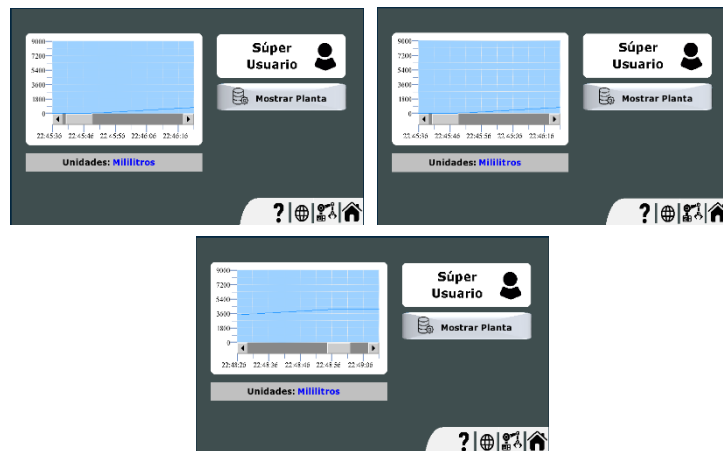


Fig.10 Gráficas de control. Variable nivel

En el presente estudio se evaluó el comportamiento de un sistema de control de temperatura. Se realizaron tres gráficas de control, en las que se monitoreó la temperatura en grados Celsius, Kelvin y Fahrenheit, respectivamente, y se comparó con el valor deseado de 40 grados. Se evidenció una estabilidad en la temperatura y una rápida respuesta del sistema ante variaciones por perturbaciones en la temperatura, lo que demuestra la capacidad del sistema para controlar y mantener la temperatura dentro de los límites deseados. Se puede cuantificar este resultado científicamente mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos y la comparación con el valor deseado de 40 grados, lo que demuestra la eficacia del sistema de control implementado.



Fig.11 Gráficas de control. Variable temperatura

En particular, la visualización en HMI sobre el control de velocidad y distancia del sistema permitió una supervisión precisa y en tiempo real del proceso. Las imágenes presentadas en este estudio mostraron claramente los lapsos de tiempo en los que se presentaba movimiento en la banda, lo que permitió una

identificación rápida y eficaz de cualquier posible problema en el proceso. Además, la capacidad de regresar al valor de 0 al culminar el recorrido para llegar al punto de referencia indicado demostró la alta precisión del sistema en el control de la posición y velocidad

En la Fig.12, se llevaron a cabo pruebas de control de un encoder en un rango de 0 a 140 RPM. Las gráficas de estudio mostraron que el uso del variador de RPM en el HMI permitió un control preciso de la velocidad en todo el rango de pruebas.



Fig.11 Gráficas de control. Variable Velocidad

4.3 Precisión de sistema

Con fundamento en los resultados de las distintas pruebas experimentales efectuadas en conjunto por dispositivos de medición y sensores que no forman parte del sistema, se registró que el porcentaje de la desviación de la magnitud presentada por cada sistema es de: 0.4% para temperatura, 0.7% para nivel y 0.23% para velocidad.

4.4 Método de consulta

Se registra un tiempo general desde la adquisición, procesamiento y despliegue de la información de 100 milisegundos, esto apoyado para el envío de información por el protocolo de comunicación serial, además de un retardo adicional despreciable generado por los ciclos de procesamiento de variables en Macros. Para el caso particular de las gráficas, se presenta el registro de las variables por una tasa de actualización de 1 segundo.

4.5 Capacidad de control sobre actuadores

Para esta prueba, se realizó una experimentación de al menos 100 veces las pruebas del accionamiento de la bomba y en ninguna vez falló el accionamiento; esto por causas de problemas con el control del sistema a través de la HMI, así mismo la duración de la operación continua del sistema de 5 horas de operación sin que se requiriera un reinicio. Este aspecto presenta una mayor flexibilidad sobre el funcionamiento continuo de los elementos que componen al sistema.

4.6 Tiempo de procesamiento

Como dato adicional, se tiene un tiempo establecido de adquisición y muestra de datos de 1 s, en el cual se presenta la información de forma gráfica al operador. Este ciclo fue

asignado tomando en cuenta la capacidad de la unidad de procesamiento del equipo, siendo de tipo ARM RISC a 32 Bits.

6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados, la HMI desarrollada demostró un funcionamiento seguro, efectivo y simplificado, así mismo fue capaz de mantener un acceso parcial o total, de acuerdo con los requerimientos de índole gerencial, así mismo, gracias a una presentación y disposición simplificada para su uso se logró una experiencia de usuario simple pero óptima. De la misma manera, el tiempo requerido para la adquisición y procesamiento de datos mejora la operación de los actuadores para ejecutar acciones de regulación. Así mismo, el sistema logró manejar diversas variables de proceso de forma simultánea, demostrando ser flexible para ser adaptada a necesidades específicas de los procesos industriales. Con base a los resultados, el sistema puede ser implementado en sistemas de producción de forma confiable. Finalmente, cabe destacar que el sistema mantiene demostrando la importancia de las HMI's en procesos industriales, los cuales requieren del monitoreo permanente, así como de una vigilancia permanente, siendo que se provee seguridad para un usuario al no estar necesariamente en el área operativa, así como en la garantía en alcanzar la calidad de los productos producidos en la planta.

REFERENCIAS

- [1] E. Mendoza et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2090 012122
- [2] Hernández, R., & Pérez, A. (2021). Interfaz hombre-máquina: concepto, evolución y aplicaciones. Revista de Ciencias Tecnológicas, 5(1), 45-57. doi: 10.5377/rct.v5i1.10735.
- [3] Kuo, M., & Ergen, E. (2019). Human-machine interface design for process control applications. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [4] Rosado-Muñoz, A., & Díaz-Méndez, M. (2020). Diseño de interfaces hombre-máquina (HMI) para sistemas automatizados. México: Universidad Nacional Autónoma de México
- [5] Sánchez, J., Pérez, E., & Gómez, A. (2022). Uso de interfaces hombre-máquina en la industria manufacturera: Una revisión sistemática. Revista de Tecnología e Innovación, 9(1), 23-39. doi: 10.5377/rct.v5i1.10735.
- [6] Wright, P. (2017). HMI and PLC: A Marriage Made in Heaven. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.

Diseño e implementación de un sistema de identificación de figuras por visión artificial utilizando Visual Studio

O. García, *E. Sánchez, O. López, S. X. Márquez, J. J. Méndez y Y. E. Ramos

*Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Av. Universidad No.350,
Carretera Federal Cuicláhuac-La Tinaja, Localidad Dos Caminos C.P. 94910, Cuicláhuac, Veracruz. (correo electrónico:
eduardo.sanchez@utcv.edu.mx)**

Resumen: La implementación de sistemas automáticos mediante visión artificial ha colaborado disminuyendo la intervención del ser humano dentro de los sistemas de producción, siendo la identificación de objetos o de figuras, una de las aplicaciones más reconocidas de esta tecnología. De tal modo que proporciona un gran número de ventajas como la mejora de la calidad de productos, el aumento de la eficiencia de la producción y la reducción del costo de mano de obra. Por ello, en este artículo se presenta la implementación de un sistema de identificación de figuras geométricas mediante el uso de Visual Studio, el cual se basa en algoritmos de programación, responsables de obtener las características físicas de cada figura, como la forma, el tamaño y el color, apoyándose del uso de un PLC y un HMI industrial para su procesamiento. De igual manera, se presentan resultados concretos a partir de pruebas realizadas en las cuales se compara la efectividad que tiene este sistema a diferencia de lo que ofrecería una persona realizando el proceso de identificación de figuras sin hacer uso de la visión artificial.

Palabras clave: Reconocimiento de patrones visuales, Controlador lógico programable, Automatización, Proceso, Seguridad.

1. INTRODUCCIÓN

La visión artificial es la disciplina científica que observa y analiza imágenes reales para producir información específica, que luego es asimilada y procesada en un conjunto de programas informáticos. Una manera fácil de entender este sistema es confiar en nuestros propios sentidos. Los seres humanos usan los ojos para comprender el mundo que los rodea, y la visión artificial intenta reflejar lo mismo en las máquinas, las cuales buscan ser capaces de percibir y comprender una imagen o una secuencia de imágenes y tomar las medidas correspondientes ante una determinada situación (Augusto, 2022). La evolución en cuanto a la innovación y avance tecnológico ha obligado a la humanidad a implementar formas alternas de trabajo, especialmente en la industria, en donde la visión artificial toma un papel importante para la automatización de procesos. Realizar acciones de percepción visual y procesamiento a alta velocidad para un individuo no es una tarea sencilla, probablemente solo sea capaz de realizarlo de manera limitada ya que posee una determinada cantidad de capacidad visual y cuenta con un grado de comprensión del proceso. No obstante, hay otros factores a tomar en cuenta, como lo es la consistencia al repetir la prueba, la interpretación sujeta al error humano o el tiempo de respuesta que se podría proporcionar, ya que como se sabe, el ojo humano está limitado hablando en términos de velocidad. Así mismo, tener una persona encargada de estar concentrada y sin cansancio durante todo el proceso es prácticamente imposible; con lo anterior, puede ser inferido que hay una búsqueda de una solución que motive al desarrollo de la visión artificial, entendiendo que el ser humano no puede cumplir con las

exigencias necesarias para los procesos de producción a gran escala debido a sus capacidades físicas. La globalización de la economía es otro reto para el sector industrial de cada país en temas de sostenibilidad y competitividad a nivel internacional. Lo anterior, implica la búsqueda para el mejoramiento de los procesos industriales que garanticen un incremento relacionado con el volumen de producción, la estandarización y el control de calidad de los productos y servicios, simultáneamente, siendo eficiente con respecto al consumo de la materia prima en búsqueda del beneficio del medio ambiente (Furferi y Servi, 2023). Por ejemplo, la alta demanda en la industria alimentaria ha creado la necesidad de implementar una forma rápida y eficaz de controlar la calidad de productos alimentarios, lo que ha llevado a la aplicación de sistemas inteligentes como la visión artificial para determinar las propiedades internas y externas de los frutos resultando en la etapa de madurez (Villaseñor et al., 2020). Actualmente la producción y prestigio de las empresas depende en gran cantidad de la rapidez, eficacia y calidad a la hora de manufacturar sus productos. Por ello, es importante evaluar los costos y beneficios de los diferentes métodos de clasificación y así seleccionar el más adecuado según las necesidades y requerimientos específicos de cada sistema productivo. En algunos casos, la inversión en tecnologías avanzadas puede ser rentable a largo plazo para reducir costos y mejorar la calidad del proceso de clasificación (Zhu et al., 2022). La visión artificial presenta una solución dirigida hacia la automatización industrial. Una gran parte de las actividades industriales han tenido muchos beneficios gracias a la aplicación de la tecnología de visión artificial en los procesos productivos. Existen diversos proyectos que aplican la visión artificial dentro

de la producción agrícola, como por ejemplo en (Cuchiye, 2022; Augusto, 2022) e incluso para la evaluación del estado de maduración o grado de fermentación de algunas frutas (Rosero, 2018; Villaseñor et al., 2020). Así mismo, podemos encontrar la aplicación de la visión artificial para la detección y control de plagas (Remboski et al., 2018; Uzun et al., 2022). Sin embargo, el acceso a proyectos donde se aplique la comunicación con PLC's (Controladores Lógicos Programables) es limitado (Logroño, 2022), lo cual es un reto importante para considerar y crear una innovación para futuros proyectos que permitan impulsar la visión artificial en la detección de figuras aplicable a procesos industriales de manufactura como se muestra en (Schlosser et al., 2019).

1.1 Organización del documento

El presente artículo se encuentra dividido en 4 secciones:

En la sección 2 se puede consultar la descripción del objeto de estudio, el cual define lo que se busca analizar, comprender y explicar mediante la implementación de este sistema, enfocado en la identificación de figuras para analizar la forma, el tamaño y el color de las diferentes figuras geométricas. En la sección 3 se muestra el desarrollo del sistema de visión artificial, en la cual, se detalla a fondo los materiales y componentes utilizados y se describen los procedimientos necesarios para la implementación de este proyecto. En la sección 4 se pueden apreciar los resultados obtenidos del sistema de identificación de figuras y los proyectos futuros que se pueden implementar al mismo. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones correspondientes a la implementación del sistema.

2. OBJETO DE ESTUDIO

El sistema está enfocado en la identificación de la forma, tamaño y color de figuras geométricas, por lo tanto, se aborda el procesamiento de imágenes digitales para detectar y reconocer figuras geométricas en una imagen, y luego medir su tamaño y determinar su color. Lo anterior procesado informáticamente mediante Visual Studio. Para ello, el sistema de visión artificial utiliza algoritmos y técnicas de procesamiento de imágenes que le permiten detectar bordes y contornos de las figuras geométricas, analizar su forma y tamaño, y extraer información sobre su color. El sistema también hace uso de técnicas de segmentación de imágenes para separar las figuras geométricas del fondo de la imagen. Una vez que el sistema ha identificado las figuras geométricas en la imagen y ha medido su tamaño y determinado su color, puede utilizar esta información para clasificar las figuras según su forma y color, y realizar diversas tareas, como el conteo de figuras, el seguimiento de objetos en movimiento, o la detección de anomalías o errores en un proceso de producción.

Las figuras geométricas propuestas para este sistema de visión artificial son:

- Círculo
- Triángulo

• Cuadrado

Las cuales presentan dos tamaños: Grande: 15 cm de diámetro para círculo y 15 cm por lado para cuadrado y triángulo y Chico: 10 cm de diámetro para círculo y 10 cm por lado para cuadrado y triángulo.

Y tres colores pertenecientes al sistema RGB:

- Rojo
- Verde
- Azul

De esta forma se cuenta con un total de 18 figuras como se muestra representativamente en la Fig.1.

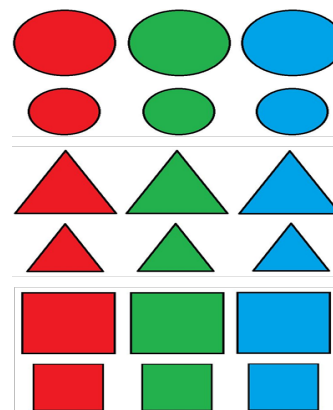


Fig. 1. Figuras geométricas por identificar

3. DESARROLLO

3.1 Transporte

Este módulo del sistema se encuentra particularizado por una banda transportadora de diseño propio, encargada del desplazamiento de las figuras de reconocimiento, las cuales serán visualizadas al situarlas en un espacio físico y confinado con luz controlada, todo esto gracias a una implementación mecánica que se encarga del desplazamiento de las piezas de reconocimiento a través de un sistema de bandas impulsada por motor. Esta implementación está ejecutada físicamente por una estructura metálica la cual cuenta con una banda de una longitud de 1,5 m, además, es accionada por un motor que opera con un voltaje de 110VCA - 120VCA y una potencia de 105W. Cuando se pulsa el botón de arranque, la banda se pone en marcha y se detiene cada vez que un sensor fotoeléctrico detecta a la figura de reconocimiento en la cámara de reconocimiento, este sensor está alimentado por una fuente de 24V y está conectado al PLC para procesar su señal, indicando de esta forma al programa cuándo debe detenerse el motor para proceder al procesamiento de la imagen por medio de la cámara conectada a Visual Studio; posteriormente, cuando este proceso finalice, la banda se pone en marcha nuevamente para desplazar la próxima figura de reconocimiento.

3.2 Medio controlado

Está diseñado de tal manera que no se puedan inducir perturbaciones de luz, las cuales puedan causar inconvenientes durante el proceso de visualización. Dentro del medio controlado se encuentra ubicada una cámara portátil de vídeo digital con resolución en 4K/30fps encargada de la identificación de figuras en conjunto de un sistema de iluminación adaptado para facilitar su funcionamiento. La comunicación de la cámara a la computadora para interactuar con Visual Studio es por medio de un cable USB tipo C. El sistema descrito en su montaje final se muestra en la Fig.2.



Fig. 2. Sistema de transporte y medio controlado

3.3 Programación

Es la parte medular del sistema, ya que se encarga del funcionamiento de la banda transportadora, de las funciones correspondientes mediante Visual Studio para realizar la identificación de figuras y de la comunicación entre los diversos componentes y programas, como GX Works2, que forman parte del sistema.

3.3.1 Programación en Visual Studio 2022

En esta sección del sistema ocurre la identificación de las figuras geométricas mediante la programación en lenguaje C#, encargado de todas las funciones para determinar la forma, color y tamaño de cada una de ellas, obtenidos a partir del procesamiento de imágenes. Este procesamiento se realiza mediante el uso de clases, métodos y funciones especiales que son utilizables gracias a la implementación de librerías, siendo la librería Emgu.CV responsable de proporcionar una amplia gama de funciones de procesamiento de imágenes, como la detección de bordes, el filtrado, la segmentación y la transformación, dicha librería la cual se puede observar en el código fuente que se muestra a continuación en la Fig. 3.

```

1  using Emgu.CV;
2  using Emgu.CV.Cuda;
3  using Emgu.CV.CvEnum;
4  using Emgu.CV.Structure;
5  using Emgu.CV.Util;
6  using System;
7  using System.Collections.Generic;
8  using System.ComponentModel;
9  using System.Data;
10 using System.Drawing;
11 using System.Linq;
12 using System.Text;
13 using System.Text.RegularExpressions;
14 using System.Threading.Tasks;
15 using System.Windows.Forms;
16 using ActUtilTypeLib;

```

Fig. 3. Librerías utilizadas en Visual Studio

De igual manera, en la última línea se observa la implementación de una librería llamada "ActUtilTypeLib", la cual pertenece al componente MX de Mitsubishi, marca correspondiente al PLC con el que se va a trabajar. Esta librería permite a Visual Studio comunicarse con la programación del PLC, agregando dentro de la clase del formulario en Visual Studio la línea de código: `public ActUtilType plc = new ActUtilType();`. A través de la variable "plc", se pueden acceder a las funciones proporcionadas por la clase ActUtilType para comunicarse con el PLC y realizar las operaciones correspondientes. De esta manera, lo que se busca es crear un sistema en donde el usuario pueda recibir información tanto del HMI de Visual Studio como del PLC, encargado de controlar el HMI industrial y controlar un sistema de indicadores físicos.

3.3.2 Programación en GX Works2

La programación del PLC Mitsubishi FX3U 56MR, hecha en el software GX Works2, comprende la activación de la banda por parte del usuario, representada por la salida Y000, y la desactivación de la misma durante 3 segundos cuando una señal del sensor fotoeléctrico es recibida, indicando que la figura ha llegado al medio controlado y que debe iniciar la intervención de la programación en Visual Studio en conjunto con la cámara para realizar el procesamiento de la imagen.

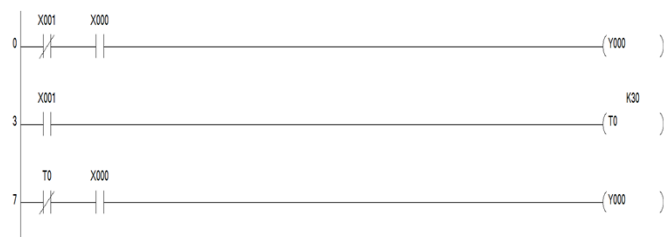


Fig. 4. Programación de motor y de sensor fotoeléctrico

Por otra parte, la programación también se encarga de controlar un sistema de indicadores montados sobre el tablero donde se encuentra el PLC, esto es mostrado por la siguiente Figura.

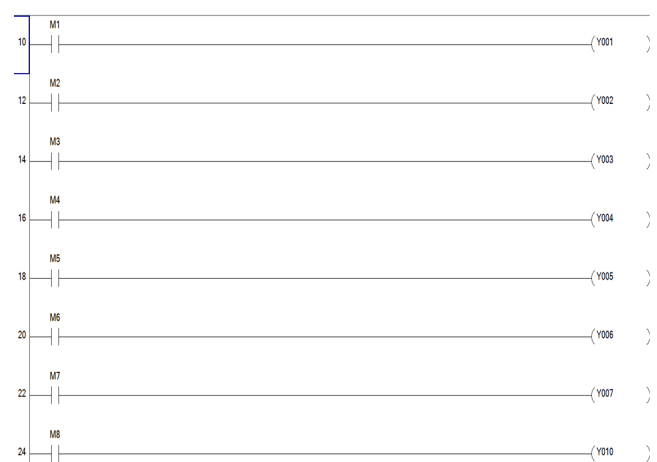


Fig. 5. Programación del sistema de indicadores.

Los contactos abiertos representados en la programación como se visualiza en la Fig. 5 corresponden a “marcas”, las cuales son activadas por medio de la comunicación con Visual Studio. Sin embargo, para permitir la comunicación es necesario realizar la configuración correspondiente entre el PC y el PLC mediante el complemento “*Communication Settings Utility*” del componente MX mencionado anteriormente, definiendo el tipo de comunicación, puerto, modelo del PLC, entre otros, como se muestra a continuación:

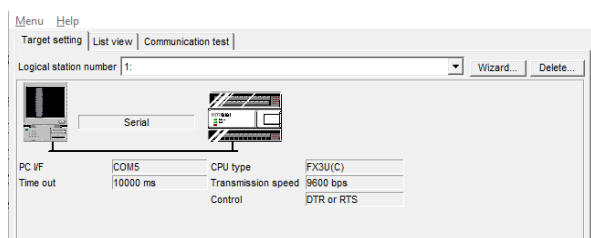


Fig. 6. Comunicación entre PC y PLC

Cada marca representada en la Fig.5 está asignada a una forma, un tamaño y un color diferente, las cuales serán activadas por Visual Studio una vez hecha la comunicación, dando como resultado la activación de las salidas representadas por Y, contando con un total de 8 salidas, correspondientes a 3 formas, 2 tamaños y 3 colores. Una vez que las salidas son activadas en el PLC, el sistema de indicadores se pone en marcha, y este cambia respecto a la figura detectada, contando con el mismo número de salidas (8 indicadores diferentes). De igual manera, las salidas son enviadas a la HMI industrial haciendo uso de la comunicación serial que existe entre el PLC y el HMI por medio del protocolo RS-232, logrando así, la recepción de datos por parte del HMI para su respectivo funcionamiento.

3.4 Visualización

3.4.1 HMI en Visual Studio

Es la pantalla en la cual se visualiza en línea lo que está capturando la cámara, de aquí parte el procesamiento de imágenes, el cual es proporcionado a través de cuatro *pictureBoxes* diferentes y controlados a partir de la modificación del umbral y de otros valores, como se muestra a continuación por la Fig.7.

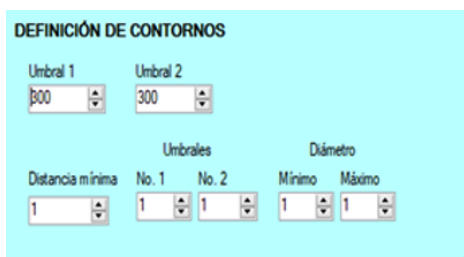


Fig. 7. Pantalla HMI en Visual Studio

3.4.2 HMI Industrial

Esta pantalla, correspondiente a la marca KINCO, modelo GL070E, depende de la programación del PLC, ya que cada salida está asignada a un indicador dentro del HMI, los cuales serán encendidos cuando las salidas sean activadas y se mostrará una figura representativa de la figura que se está detectando en tiempo real como se muestra a continuación en la siguiente Figura.

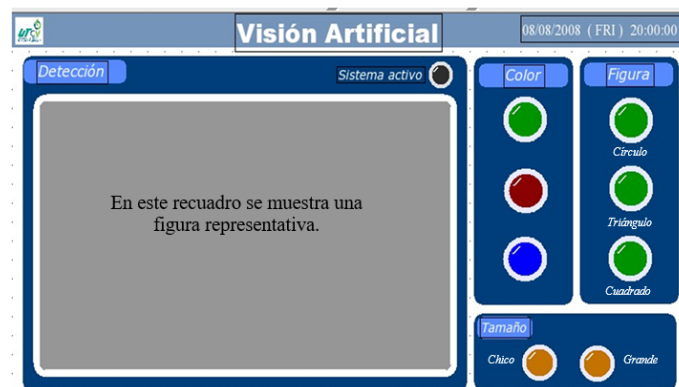


Fig. 8. Representación de la pantalla HMI industrial

3.4.3 Sistema de indicadores

Este sistema se encuentra de manera física implementado en el tablero donde se encuentra el PLC y el HMI industrial, esto se puede apreciar en la Fig. 9.

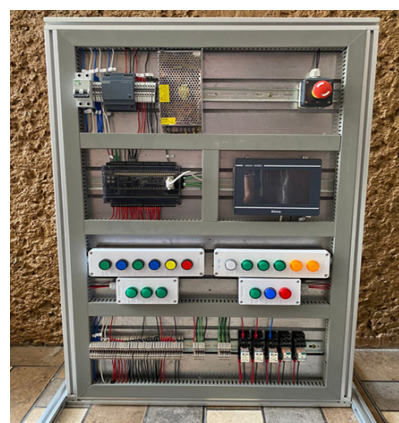


Fig. 9. Tablero de control.

El sistema cuenta con 9 indicadores localizados en el sector derecho del tablero, los cuales cumplen con la siguiente simbología, respetando la posición de izquierda a derecha:

- Indicador blanco: Representa que el sistema de visión artificial se encuentra activo.
- Indicador verde número 1: Representa que la figura detectada corresponde a un círculo.
- Indicador verde número 2: Representa que la figura detectada corresponde a un triángulo.

- Indicador verde número 3: Representa que la figura detectada corresponde a un cuadrado.
- Indicador naranja número 1: Representa que la figura detectada es grande.
- Indicador naranja número 2: Representa que la figura detectada es chica.
- Indicador inferior verde: Representa que la figura es verde.
- Indicador inferior azul: Representa que la figura es azul.
- Indicador inferior rojo: Representa que la figura es roja.

4. RESULTADOS

Tras una serie de pruebas en las cuales se sometió cada figura con al menos 20 intentos para ser detectadas por el sistema, se presentaron los siguientes resultados.

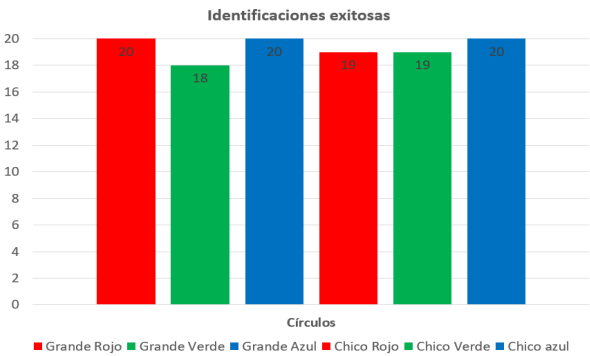


Fig. 10. Gráfica de identificación de círculos.

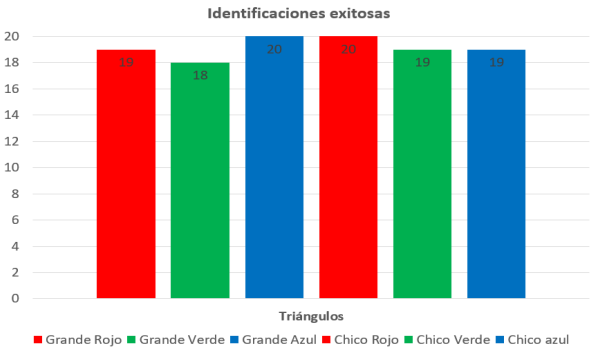


Fig. 11. Gráfica de identificación de triángulos.

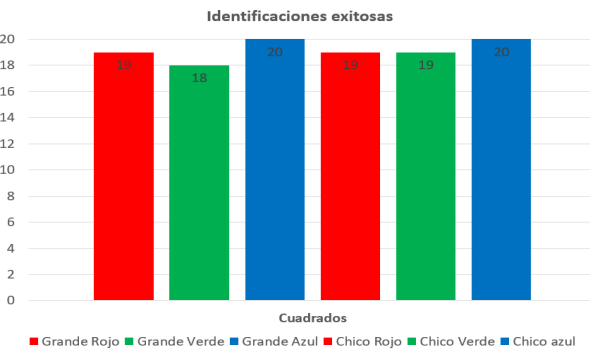


Fig. 12. Gráfica de identificación de cuadrados.

Con ello, el porcentaje de efectividad para cada figura es:

- Círculos: 116 de 120 intentos exitosos con una efectividad del 96.66%.
- Triángulos: 115 de 120 intentos exitosos con una efectividad del 95.83%.
- Cuadrados: 115 de 120 intentos exitosos con una efectividad del 95.83%.

Las figuras que no fueron detectadas exitosamente son producto de la latencia de la cámara utilizada de acuerdo a su capacidad de captura de cuadros por segundo (30fps).

El aspecto visual de la HMI del sistema en Visual Studio se muestra a continuación en la Fig. 13.



Fig. 13. Aspecto de la HMI durante la identificación.

De igual manera, se realizó una prueba en la cual se comparó el número de figuras por minuto que el sistema es capaz de identificar y cuántas figuras identifica una persona, esto anterior, tomando en cuenta que la persona se encuentre a un metro del punto medio de la banda transportadora, considerando también que las figuras se encuentran en constante movimiento. A partir de este resultado, y suponiendo que tanto el sistema de identificación de figuras como la persona se encuentran trabajando durante el tiempo propuesto en condiciones realistas, se pueden estimar los siguientes valores:

Tabla 1. Comparación del número de figuras detectadas.

	Por minuto	Por hora	Por día
Visión artificial	12	720	17,280
Persona	7	420	10,080

Por último, se realizó una comparación entre los diferentes sistemas de visión artificial que ofrecen el porcentaje de efectividad correspondiente, resultando de la siguiente manera:

1. El sistema del presente artículo cuenta con un 96.1%.

2. En (Uzun et al., 2022) se presenta una efectividad del 94.05% en la detección de la mosca mediterránea en frutos.

3. En (Remboski et al., 2018) se presenta una efectividad del 86.38% en la detección de moscas en trampas inteligentes.

4. En (Furferi y Servi, 2023) se presenta una efectividad del 83% en la clasificación de tejidos de lana por color.

5. En (Augusto, 2022) se presenta una efectividad del 79.25% en la identificación de kikuyo.

6. En (Rosero, 2018) se presenta una efectividad del 75% en la detección del grado de fermentación de granos de cacao. De esta manera, se puede afirmar que el sistema del presente artículo cuenta con mejores resultados sobre los demás, considerando que se debe al conjunto de materiales, software y métodos utilizados para el desarrollo del mismo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que cada sistema está aplicado a diferentes fines y vuelve la interpretación de manera subjetiva.

4.1 Proyectos futuros

Se propone aumentar el número de elementos bajo detección. De igual manera, se podría extender el sistema para detectar figuras específicas en procesos industriales, lo que aumentaría su versatilidad y aplicaciones potenciales. Así mismo, se plantea expandir el sistema para detectar figuras de más tamaños y colores. Si bien el proyecto actual tiene una tasa de éxito alta, se podría trabajar en mejorar la precisión de la detección incorporando otra cámara con una mayor tasa de captura, considerando una tasa mínima de 60 fps, o haciendo uso de sensores, hardware y software más sofisticados tanto para la detección como para el procesamiento.

5. CONCLUSIONES

El sistema de identificación de figuras por visión artificial demostró que la diferencia entre el número de figuras detectadas por una computadora y por una persona es considerable, tomando en cuenta que se evaluaron ambas partes en las condiciones realistas: funcionando en su totalidad y sin interrupciones. A pesar de ello, los resultados fueron mayormente favorables para la computadora, esto a partir del alto índice en la detección correcta de las figuras. Así mismo, hay que considerar otros factores relacionados a las capacidades de las personas, ya que como sabemos, es imposible tener a un empleado trabajando las 24 horas del día sin descanso, sin distracciones y lo más importante, sin cometer equivocaciones. Por lo tanto, siendo más objetivos y tomando en cuenta estos factores, la diferencia aumenta, sobrepasando por completo lo que puede ofrecer una persona normal. Es importante destacar que el sistema de visión artificial no es infalible, y aún puede mejorar su rendimiento en términos de precisión y velocidad. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que el sistema es capaz de superar a una persona en la identificación de figuras geométricas simples. Es por ello que la visión artificial promete

ventajas en la automatización, control de calidad, reducción de costos, productividad y mejora en la seguridad laboral.

REFERENCIAS

Augusto, C. M. C. (2022). Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Desarrollo de un prototipo para la detección de kikuyo en tiempo real mediante visión artificial en cultivo de hortalizas.

Cuchiye, C. W. C. (2022). Repositorio Digital Universidad Técnica de Cotopaxi: Desarrollo de una aplicación móvil para determinar el grado de fermentación de los granos de cacao (*Theobroma Cacao L.*) aplicando técnicas de visión artificial basadas en deep learning.

Furferi, R. y Servi, M. (2023). A Machine Vision-Based Algorithm for Color Classification of Recycled Wool Fabrics. *Applied Sciences*, 13(4), 2464.

Logroño, S. F. W. (2022). Repositorio Universidad Técnica de Ambato: Sistema inteligente para el control y monitorización de una estación robotizada utilizando control motion y visión artificial.

Remboski, T. B., de Souza, W. D., de Aguiar, M. S. y Ferreira Jr, P. R. (2018). Identification of fruit fly in intelligent traps using techniques of digital image processing and machine learning. *SAC '18: In Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing* (pp. 260-267).

Rosero, P. P. G. (2018). Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Comparación de técnicas de visión artificial para determinar el grado de fermentación de varios tipos de granos de cacao en el proceso postcosecha en la región litoral del Ecuador.

Schlosser, T., Beuth, F., Friedrich, M. y Kowarkp, D. (2019). A novel visual fault detection and classification system for semiconductor manufacturing using stacked hybrid convolutional neural networks. *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*.

Uzun, Y., Tolun, M., Eyyuboglu, H. y Sarı, F. (2022). An intelligent system for detecting Mediterranean fruit fly [Medfly; *Ceratitidis Capitata* (Wiedemann)]. *Journal of Agricultural Engineering*, 53(3).

Villaseñor, M. J., Bravo, M. G., Padilla, J. A., Vázquez, J. L., Guevara, R. G., García, F. J. y Barranco, A. I. (2020). A Maturity Estimation of Bell Pepper (*Capsicum annum L.*) BY Artificial Vision System for Quality Control. *Applied Sciences*, 10(15), 5097.

Zhu, Q., Zhang, Y., Luan, J. y Hu, L. (2022). A Machine Vision Development Framework for Product Appearance Quality Inspection. *Applied Sciences*, 12(22), 11565.

Impulsor con aislamiento galvánico para MOSFET e IGBT:

Ing. Roberto Carlos Alvarado Maldonado*.

Dr. Mario Ponce Silva. **

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino. ***

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (e-mail: m21ce074@cenidet.tecnm.mx).

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (e-mail: mario.ps@cenidet.tecnm.mx).

*** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (e-mail: victor.op@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: In this paper a driver design is presented, the design is proposed to protect a circuit applied to float switches. A galvanic isolation technique applied to a totem-pole configuration is used to obtain a V_{dc} (10V-12V) output signal commanded by a digital signal. V_{in} input (3V-5V). Once the correct operation of the circuit has been simulated in Pspice, the PCB is designed to be able to implement the manufacture of the circuit.

Keywords: Float switches, totem-pole, galvanic isolation, digital signal.

1. INTRODUCCIÓN

El uso y aplicaciones de los transistores se pueden clasificar de manera general en dos casos; en régimen de operación acoplado capacitivamente o de puerta flotante [1]. En este contexto los MOSFET de puerta flotante son útiles para almacenar una carga eléctrica durante largos periodos de tiempo sin la necesidad de tener una conexión a tierra. En este tipo de dispositivos su compuerta flotante (FG) está eléctricamente aislada, y contiene una señal de entrada sobre la compuerta flotante cuya carga contenida puede permanecer sin variaciones durante largos periodos de tiempo [2, 3]. La configuración de puerta flotante permite aceptar un margen más amplio de tensiones de entrada.

2. PROBLEMÁTICA

En la actualidad existen múltiples aplicaciones donde se utilizan los circuitos flotados, algunos ejemplos se observan en (Fig. 1). Este tipo de circuitos presentan un comportamiento muy robusto cuando se trabaja en el rango de operación adecuado [4]. Existen distintos dispositivos y configuraciones que buscan aplicar este tipo de técnica:

- Bootstrap (Relativamente costoso y solo se pueden aplicar a ramas en serie) [5].
- Optoacopladores (Tiempo de operación lentos)[6].
- Aislamiento galvánico (Limitaciones de frecuencia)[7].

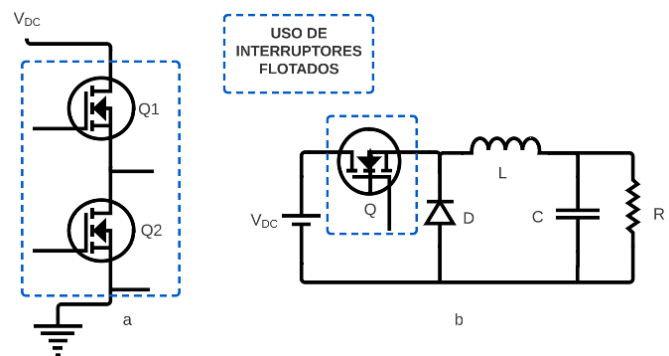


Fig. 1. Uso de interruptores flotados en circuitos a) Inversores
b) Convertidor DC-DC

Se requiere de un circuito que permita implementar un control digital sobre un circuito electrónico de conveniencia, específicamente en este trabajo se plantea el uso de una Raspberry para emitir la señal de control requerida. De las técnicas de solución planteadas en la literatura se hace uso del aislamiento galvánico aplicado a la señal del control digital.

3. OBJETIVO

Diseño e implementación de un circuito impulsor incorporando protección con aislamiento galvánico aplicado a un sistema de alimentación para lámpara LED, utilizando el circuito para blindar la señal de control de un microcontrolador.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se plantea como solución hacer uso de un circuito compuesto por cuatro bloques conectados tal como se observa en la Fig. 2 en este circuito se plantea una configuración que nos permite utilizar una señal digital la cual se encargará de emitir una señal de control (0-5V) y a su vez tener un voltaje Vdc (10-12V) conectado a una señal de salida, este arreglo se obtiene con el uso del arreglo de conexión totem-pole. Esta señal de salida va conectada directamente a un transformador de pulsos modelo (78601-3C) el cual transfiere la señal de control digital directamente al MOSFET flotado. Con lo cual se consigue poder aplicar un aislamiento galvánico a la señal digital de salida que será emitida por el microcontrolador.

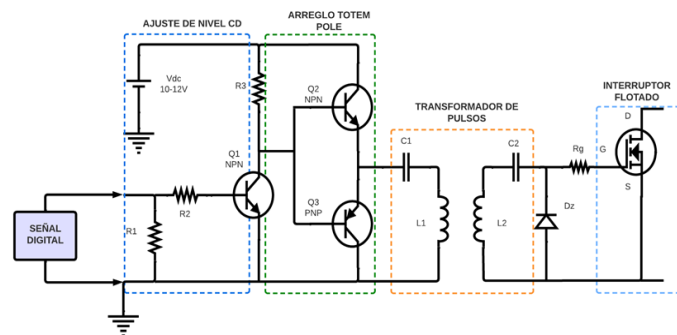


Fig. 2. Diagrama esquemático de circuito de solución propuesto agrupado por bloques.

5. RESULTADOS

5.1 Simulación en Pspice

Para comprobar el correcto funcionamiento del circuito propuesto, se procedió a realizar pruebas de simulación tanto de voltaje y corrientes que circulan en el circuito operando, las señales de control emitidas a distintas frecuencias 100kHz hasta 2MHz. Dicha simulación se realizó en el entorno de Pspice (Fig. 3).

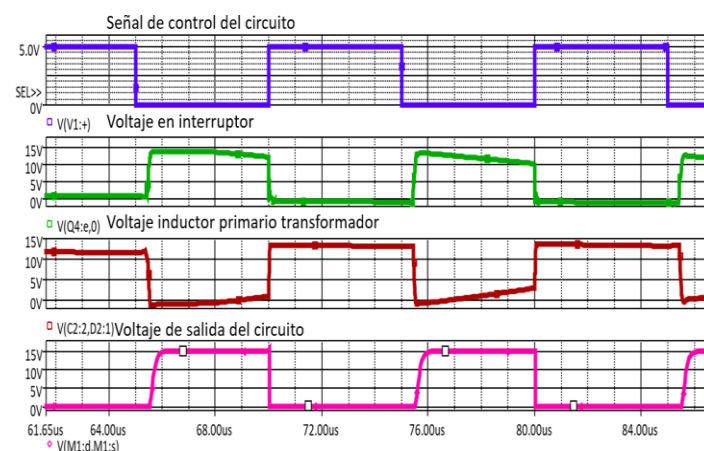


Fig. 3. Formas de onda obtenidas en simulación.

5.2 PCB del circuito

Una vez verificada la correcta operación del circuito a través del software de simulación en Pspice, se plantea el diseño de la placa PCB, se realiza su diseño en el programa Proteus y se obtienen las placas mostradas (Fig. 4) para su posterior manufactura.

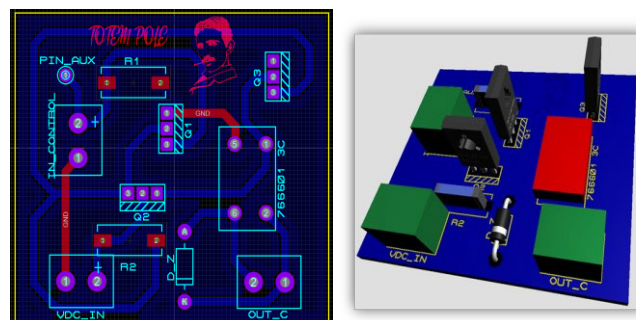


Fig. 4. a) PCB circuito propuesto. b) Diseño 3D PCB.

6. CONCLUSIONES

Se determina que es viable manufacturar el diseño propuesto para implementar en nuestro prototipo. Cabe destacar que el circuito se puede utilizar en rangos de frecuencia desde 100kHz hasta 2MHz. Esta configuración se puede utilizar en cualquier MOSFET o IGBT flotado. Es un sistema robusto y presenta un tiempo muerto intrínseco por la naturaleza del circuito.

REFERENCES

- [1] P. Hasler and T. S. Lande, "Overview of floating-gate devices, circuits, and systems," IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 48, no. 1, pp. 1-3, 2001.
- [2] G. Q. Hang, Y. N. Mo, X. C. Zhou, and D. Y. Zhang, "Novel differential logic using floating-gate MOS transistors," in 2012 IEEE 11th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, 2012, pp. 1-3.
- [3] V. Barzinska and E. D. Manolov, "A floating N-DMOS switch for RGB LED control," in Proceedings of the 17th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2010, 2010, pp. 186-190.
- [4] A. Luck, S. Jung, R. Brederlow, R. Thewes, K. Goser, and W. Weber, "On the design robustness of threshold logic gates using multi-input floating gate MOS transistors," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 47, no. 6, pp. 1231-1240, 2000.
- [5] F. Yuan, "Bootstrapping Techniques for Energy-Efficient SAR ADCs : A State-of-the-Art Review," in 2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2021, pp. 575-578.
- [6] N. Anurag and S. Nath, "Effect of Optocoupler Gate Drivers on SiC MOSFET," in 2021 National Power Electronics Conference (NPEC), 2021, pp. 01-06.
- [7] N. Rouger, J. C. Crébier, and O. Lesaint, "Integrated low power and high bandwidth optical isolator for monolithic power MOSFETs driver," in 2011 IEEE 23rd International Symposium on

Diseño de un convertidor CD/CD resonante LLC con transformador

Ing. Jorge Luis Hernández Mujica*.
Dr. Mario Ponce Silva. **
Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino. ***
Mc. Josué Lara Reyes****

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (e-mail: m22ce014@cenidet.tecnm.mx).

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (e-mail: mario.ps@cenidet.tecnm.mx).

*** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (e-mail: victor.op@cenidet.tecnm.mx).

**** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (e-mail: d18ce093@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: In this paper propose a variant of a DC/DC converter topology using a Thermogenerator. A resonant circuit is proposed that behaves as a current source and in the rectifier part as a voltage source, and operates at a frequency higher than 500 kHz to reduce its size.

Keywords: Resonant circuit, High frequency, Resonant LLC, DC/DC converter, Transformer

1. INTRODUCCIÓN

Una forma de obtener energía es por medio de la cosecha de energía que se entiende como el proceso de captación de energía a partir de fuentes inmersas en el medio ambiente [1].

Existen muchas formas para cosechar energía una de ellas es por medio de un termogenerador es un dispositivo termoeléctrico clásico basado en dos materiales semiconductores

Si la unión $n-p$ se somete a una fuente de calor que mantiene los dos extremos a diferentes temperaturas, se crea una pequeña fuerza electromotriz que induce una corriente en el circuito [2].

Se han reportado algunos usos del termogenerador en sistemas automotrices [3, 4], estufas ecológicas [5], carga de baterías [6].

Los termogeneradores son de tamaño pequeño y su mantenimiento es muy bajo, esto los hace muy rentables a la hora de cosechar energía, el termogenerador funciona como una fuente de voltaje constante.

2. PROBLEMÁTICA

Esta energía obtenida del termogenerador es utilizada para alimentar alguna carga externa, esta energía obtenida por el termogenerador no puede pasar directamente a la carga que se busca alimentar, para poder alimentar dicha carga se debe de procesar esa energía obtenida y para ello se utilizan convertidores CD/CD, estos ayudan a procesar la energía, en la figura 1 se observa cómo son las etapas del sistema.



Fig. 1. Etapas del sistema

3. OBJETIVO

Proponer una variante de una topología de un convertidor CD/CD utilizando un termogenerador.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se propone un circuito resonante LLC con transformador como se observa en la figura 2 que se comporte como una fuente de corriente en la parte del tanque resonante y en la parte del rectificador como una fuente de voltaje y que opere a una frecuencia mayor a 500 kHz para mejorar la densidad de potencia.

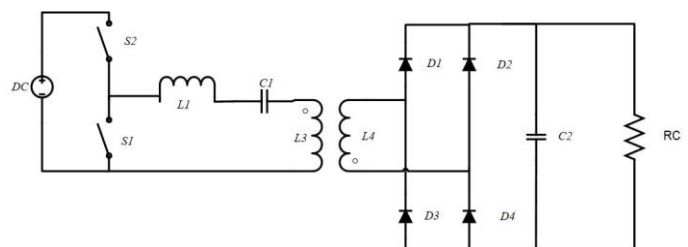


Fig. 2. Circuito resonante LLC con transformador

5. RESULTADOS

5.1 Diseño de un tanque resonante LLC con transformador

Se realiza el diseño para un convertidor CD/CD resonante LLC con transformador, en la tabla 1 se observan los valores dados para el diseño del convertidor CD/CD.

Tabla. 1. Datos para el diseño del circuito CD/CD.

Variable	Símbolo	Valor
Condición de resonancia	$\omega=\omega_0$	$\omega=\omega_0$
Potencia	P	20W
Voltaje de alimentación	VCD	12V
Frecuencia	f	500kHz
Voltaje de salida	VR	24V

En la tabla 2 se observa la descripción de cada variable y la ecuación correspondiente para calcular el valor de los componentes correspondiente y proceder al diseño del convertidor.

Tabla. 2. Descripción para el diseño del convertidor resonante LLC.

Descripción	Ecuación
Calcular el valor máximo de la fundamental	$V_1 = \frac{2V}{\pi}$
Calcular ganancia total	$M_t = \frac{V_R}{V_{CD}}$
Factor de calidad mínimo	$Q_{min} > \sqrt{M^2 - 1}$
Calcular el valor de la carga	$R = \frac{V_R^2}{2P}$
Calcular relación de vueltas	$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\pi M_t}{2M}$
Calcular la reactancia X_{Lmp}	$X_{Lmp} = \frac{R}{\sqrt{M^2 - 1}} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$
Calcular la inductancia magnetizante del primario L_{mp}	$L_{mp} = \frac{X_{Lmp}}{\omega}$
Calcular R_{eq1}	$R_{eq1} = R \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$
Cálculo de X_{lse}	$X_{lse} = \frac{jX_{Lmp}R_{eq1}^2}{jX_{Lmp} + R_{eq1}^2}$
Cálculo de R_{se}	$R_{se} = \frac{R_{eq1}X_{Lmp}^2}{R_{eq1} + X_{Lmp}^2}$
Cálculo de X_{lr} y X_{ls}	$X_{lr} = X_{cs} = QR_{se}$ $X_{ls} = X_{lr} - X_{lse}$
Cálculo de L y C_s	$L = \frac{X_{ls}}{\omega}$ $C_s = \frac{1}{X_{cs}\omega}$
Cálculo de L_{ms}	$L_{ms} = L_{mp} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$
Corriente en el tanque resonante	$I_p = \frac{V_1}{R_{se}}$

Tabla. 3. Valores obtenidos para los elementos del diseño.

Parámetros	Valores
L1	1.93μH
L2	2.74mH
L3	59.6mH
C1	52.36nF
C2	612.24nF
R1	32.67Ω

Para poder realizar que el tanque funcione como fuente de corriente es necesario tener en cuenta los siguientes datos donde:

$$X_{Lmp} = \frac{R_{eq2}}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad \text{Ecu. 1}$$

Debido a que se usará rectificador únicamente con capacitor de filtrado a la salida, es necesario elegir un valor adecuado de “M” para que Req2 siempre sea menor a Xlmp y así evitar problemas de incompatibilidad:

$$\begin{aligned} X_{Lmp} &= R_{eq2} \\ \sqrt{M^2 - 1} &= 1 \\ M &= \sqrt{2} \end{aligned} \quad \text{Ecu.2}$$

Entonces sí:

$$\begin{aligned} M &> \sqrt{2} \\ R_{eq2} &> X_{Lmp} \end{aligned} \quad \text{Ecu.3}$$

Se debe evitar que Req2 > Xlmp y se recomienda que M esté entre el siguiente rango:

$$1 < M \leq 1.4102 \quad \text{Ecu.4}$$

Se recomienda que M=1.1 para que el circuito resonante LLC se comporte como una fuente de corriente en la parte del tanque resonante y en la parte del rectificador como una fuente de voltaje.

En la tabla 3 se observan los valores obtenidos para cada elemento del convertidor resonante LLC con transformador.

5.2 Simulación en Pspice

Para corroborar los datos obtenidos se procede a simular el circuito en Pspice y comprobar el correcto funcionamiento del circuito con los valores propuestos.

En la figura 3 se observa el circuito simulado en Pspice con los valores obtenidos.

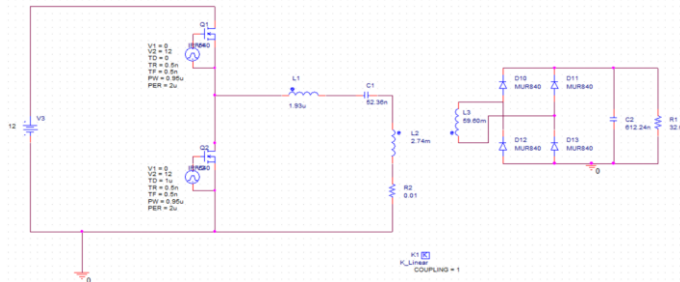


Fig. 3. Circuito simulado en Pspice

En la figura 4 se observa el voltaje obtenido en la simulación el cual fue de 25 V.

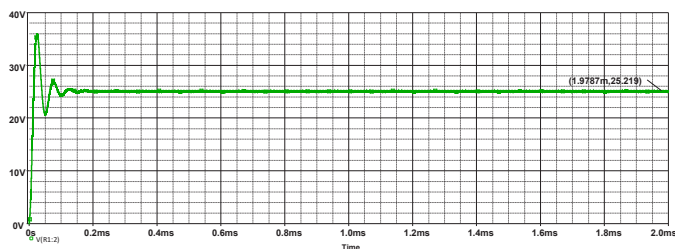


Fig. 4. Voltaje de salida en Pspice

En la figura 5 se observa en la eficiencia obtenida en la simulación la cual fue de un 87%.

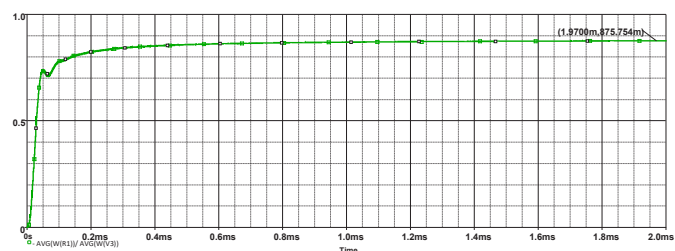


Fig. 5. Voltaje de salida en Pspice

En la figura 6 se observa que el circuito se encuentra en resonancia.

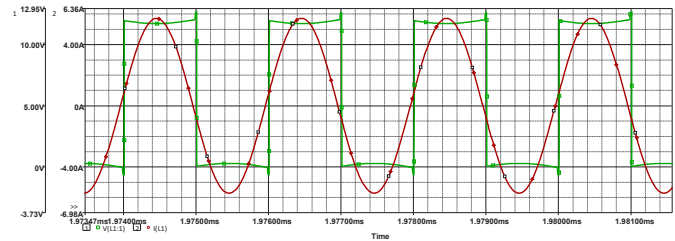


Fig. 6. Resonancia del circuito

6. CONCLUSIONES

- Se obtiene el voltaje de salida esperado de 25 V.
- Se obtiene una eficiencia del 87%.
- La simulación valida los cálculos realizados.
- El circuito está adaptado para funcionar con un termogenerador.

REFERENCIAS

- [1] C. Montes-Rodríguez, J. A. Pérez-Rodríguez, and M. Herrera-Suárez, "Análisis del estado actual de la cosecha de energía por medio de vibraciones producidas por cargas de viento," *Dominio de las Ciencias*, vol. 7, pp. 524-546, 2021.
- [2] L. E. Juanicó, G. F. Rinalde, E. V. Tagliavere, S. Gortari, and M. G. Molina, "Termogeneradores para electrificación de hogares rurales aislados," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 15, 2011.
- [3] Q. Cao, W. Luan, and T. Wang, "Performance enhancement of heat pipes assisted thermoelectric generator for automobile exhaust heat recovery," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 1472-1479, 2018.
- [4] T. K. Kumar, S. A. Kumar, K. K. Ram, K. R. Goli, and V. S. Prasad, "Analysis of thermo electric generators in automobile applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5835-5839, 2021.
- [5] K. Sornek, M. Filipowicz, M. Żołądek, R. Kot, and M. Mikrut, "Comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with wood-fired stove," *Energy*, vol. 166, pp. 1303-1313, 2019.
- [6] Z. M. Dalala, Z. S. Hamdan, H. Al-Taani, M. Al-Addous, and A. Albatayneh, "Battery charging application with thermoelectric generators as energy harvesters," *The Academic Research Community publication*, vol. 3, pp. 248-259, 2019.

Diseño e implementación de un módulo industrial para el manejo de sistemas de control multivariable utilizando PLC's

Adán. A, Aguilar. M, *Alcaraz. V, Cano. J, Morales. J. y E. Sánchez

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Av. Universidad No.350,
Carretera Federal Cuitláhuac-La Tinaja, Localidad Dos Caminos C.P.
94910 Cuitláhuac, Veracruz. (correo electrónico: 202131101015@utcv.edu.mx)

Resumen: El presente artículo muestra la implementación de un sistema de control multivariable utilizando PLC's, con el objetivo de satisfacer las necesidades en los procesos productivos de la industria actual, también se pretende garantizar la seguridad de los operadores que podrían estar en escenarios de riesgo por las diversas magnitudes que se ocupan, así mismo, mantener la operación estable de los sistemas en las tareas que se requerían desarrollar.

Palabras clave: Controlador Lógico Programable, Interfaz hombre máquina, Automatización, Proceso, Seguridad.

1. INTRODUCTION

En el sector industrial existen factores que implican poner en riesgo la integridad del obrero/operario[6], debido a que no en todos los casos se cuenta con el equipo o maquinaria automatizada para realizar trabajos de riesgo, un ejemplo de ello es operar válvulas, tanques, tuberías, entre otros, en donde pueden presentarse condiciones adversas para el operador, con lo cual las probabilidades de sufrir un accidente se incrementa. Hablando en términos de temperatura, esta al ser una magnitud física variable y un fenómeno natural, se enfrenta a la manipulación de muchos factores incluido influencias humanas que pueden poner en riesgo al obrero/operario. La implementación de sistemas de control y/o monitoreo, tiene motivación en la búsqueda para reducir el índice de riesgo trasladando al operario de la zona operativa hacia el control y monitoreo a través de instrumentos virtuales comunicados a un PLC (Controlador Lógico Programable), esto, siempre que sea posible. Hoy en día, las empresas en su mayoría del sector industrial buscan implementar PLC's para reducir el riesgo de los empleados durante la ejecución de sus encomiendas laborales, así mismo, buscando asegurar la calidad de los productos y/o servicios ofrecidos y cuidando la eficiencia de los mismos. Gracias a la implementación de estos equipos es posible obtener datos de sensores analógicos y digitales en línea, tomando múltiples lecturas con la finalidad de ejecutar las acciones adecuadas que hagan operar a los sistemas de forma segura y estable, se piensa en la seguridad del operador, es decir, se busca cubrir que sea adecuado su uso, no solo en áreas accesibles sino también en áreas donde el acceso es limitado, esto debido a que en la industria al tener diversos procesos productivos con uso de ciertas áreas, donde podría haber incidentes, tal como lo son, tolvas de grandes dimensiones, hornos en donde se está procesando cierto producto a una temperatura elevada, como también podría ser

una temperatura baja, es por eso que se busca mediante este sistema de control multivariable prevenir incidentes, monitoreando desde un área distinta a el área en donde se encuentra la variable física. Una de las mejores opciones para solucionar esta situación son los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) [2,3]; apoyándose en redes LAN (Local Área Network), dando como resultado, sistemas que permiten la multiconexión, con ello, implementar la adquisición de datos más segura y estable con aplicaciones en monitoreo y manejo de variables, incorporando sistemas de HMI's (Interfaces Hombre Máquina) [1]. La automatización para la producción de grandes volúmenes suelen ser vistos en el sector productivo global, además, es necesario tomar en cuenta el control de calidad, por lo que la automatización se ha visto implementarse a favor de la competitividad [5].

1.1 Organización del documento

En el actual documento se divide en secciones, en la sección 2, se encuentra la descripción del objeto de estudio especificando sus componentes y las señales que manejan, en la sección 3, se explica el proceso con el cual se demuestra el funcionamiento del presente proyecto, finalmente, en la sección 4, se describen los resultados obtenidos abordando una conclusión al final del trabajo.

2.OBJETO DE ESTUDIO

En el artículo se tomará como objeto de estudio el procesamiento de datos a través de un PLC para la industria, los sistemas a considerar son:

- PLC FX3U 56RM: Controlador encargado del procesamiento de los datos adquiridos mediante los sensores.

- Encoder Codificador DC5-24V 600 P/R: Sensor de posición encargado de proporcionar los datos de la posición de un motor.
- Motor a pasos Nema 24v 3A y 1.2Nm. Encargado de poner en marcha un sistema mecánico.
- Termopar Pt100: Sensor de temperatura encargado de la medición de temperatura.
- Sensor de nivel TL231: Sensor encargado de medir el nivel durante el proceso de llenado y vaciado de un tanque.
- Bomba de diafragma TECNEU: Actuador que se encarga del llenado y vaciado del fluido que se encuentra en los tanques.
- HMI KINCO GL070E: Pantalla-interfaz hombre-máquina que permite la visualización en línea de los datos generados por los sensores y actuadores.

3.DESARROLLO DEL PROYECTO

El sistema presenta la manipulación de tres variables distintas, las cuales son: posición de motor, temperatura y nivel de un fluido dentro de un contenedor, de esta manera, el tablero está conformado de un exhibipanel de 0.5m de alto por 0.5m de ancho, con un marco de perfil de aluminio industrial 20mm x 20mm, además, se incorporan canaletas que dividen al tablero en tres secciones, la sección de control, la sección de potencia y la sección de indicadores, tal como se muestra en la Fig. 1.

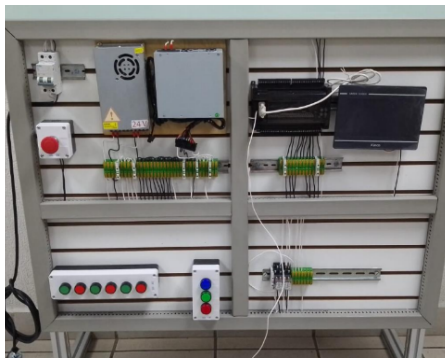


Fig. 1 Implementación física del sistema de control basada en PLC

En la primera sección (sección de control) se encuentra la HMI, donde se mostrarán tanto los controles virtuales como representaciones gráficas en línea de las variables. La HMI utilizada en esta sección en conjunto con el PLC se muestra en la Fig. 1. La sección de potencia cuenta con dos fuentes de alimentación, una de 12VCD, otra de 24VCD y una última de 5VCD; con ellas, se alimentan los diferentes componentes que se utilizan en el sistema, tales como relevadores, bomba, termopar, encoder, nema, driver, microcontrolador, indicadores; también en esta sección, se encuentra un botón de arranque, un botón de paro de emergencia y una pastilla termomagnética, la cual tiene la finalidad de proteger eléctricamente los elementos y equipos conectados. Por último, hay indicadores se encuentran tanto en la parte física y en la parte virtual con el

objetivo de lograr una representación física certera del sistema, además se incorporan un grupo de indicadores luminosos y botoneras con los cuales se accionan los distintos sistemas de control/instrumentación que se encuentran en el sistema principal. El desarrollo del procesamiento de datos, comienza en la parte de potencia, es en esta en donde se alimenta todo el sistema de instrumentación, aquí se puede encontrar tanto la fuente de alimentación de 5VCD con la que se alimenta un microcontrolador el cual controla a un driver (se muestra en la Fig.6) que hace el movimiento del nema, también la de 24VCD que energiza al PLC, al driver antes mencionado así como la fuente de alimentación de 12 VCD que provee la energía eléctrica a los sensores y bomba, una vez abordada la etapa de potencia, en la etapa de control se realiza la recepción de señales de los diferentes sensores para obtener el control y monitoreo de las variables abordadas, para después procesarlas en el PLC, en él, se encuentra la programación que hace posible ejecutar las señales de salida del sistema, el flujo de adquisición y ejecución del sistema se aprecia en la Fig.5. En cuanto al sistema de control de posición del motor, se utiliza un encoder con el cual se mide la velocidad angular en términos de revoluciones por minuto (rpm), lo anterior se logra por la regulación de pulsos. su estructura se puede observar en la Fig.2.

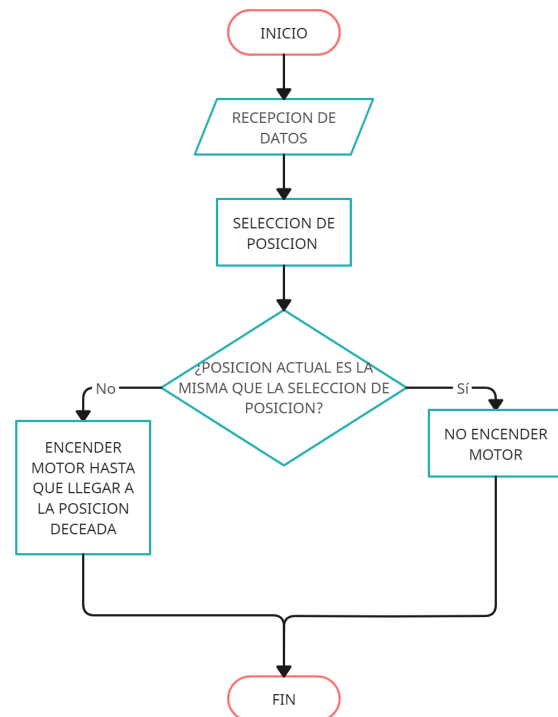


Fig.2. Diagrama de flujo de estructura de Control de posición

En cuanto al control de temperatura, se ocupa un módulo dimmer para realizar la manipulación de la magnitud a la temperatura deseada, para lograr esto se utiliza un termopar que adquiere la magnitud de la temperatura para pasar la señal dada a través de un sistema que la transforma a un rango de 0V - 10V, para posteriormente leerlo con una entrada analógica preestablecida en el PLC, y mostrarlo por medio del HMI, su estructura se puede observar en la Fig.3.

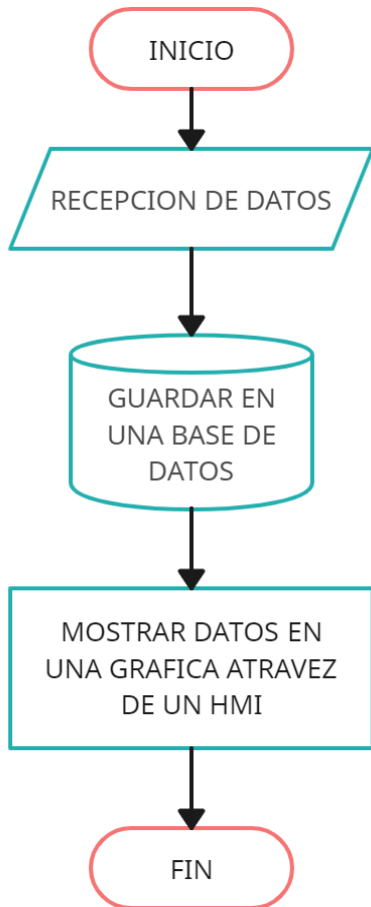


Fig.3.Diagrama de flujo de estructura de Control de temperatura

Para el control de nivel, primero se empiezan a hacer lecturas del nivel actual del fluido, posteriormente se selecciona el nivel al que se desea llegar (setpoint) a través del HMI, las lecturas se utilizan para hacer un promedio, el cual se compara con el nivel seleccionado por el usuario(setpoint), y dependiendo de la comparación, se puede activar una bomba para el desplazamiento del fluido, ya sea en cuestión de llenado o vaciado, su estructura se puede observar en la Fig.4.

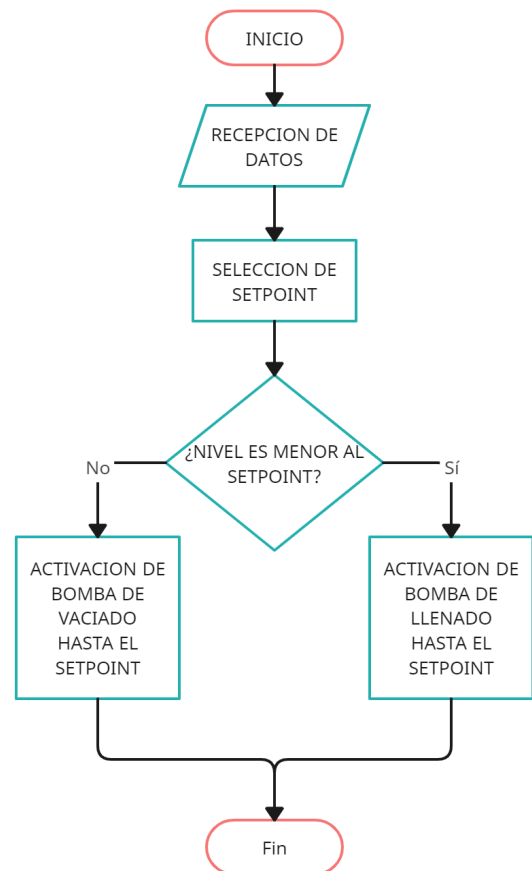


Fig.4.Diagrama de flujo de estructura del sistema Control de nivel

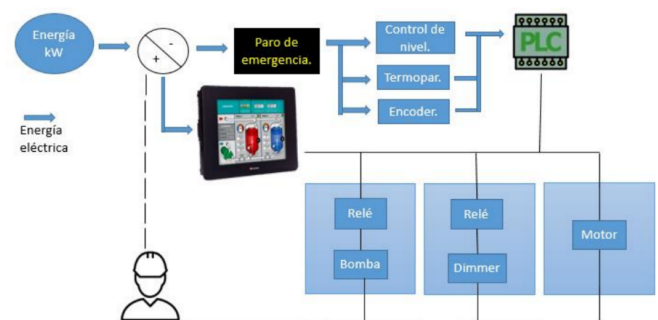


Fig.5. Diagrama de bloques.



Fig.6.Driver

4. RESULTADOS

En los resultados se logra observar el buen funcionamiento en conjunto de los tres operando por medio del PLC y HMI en interconexión. Para la variable de temperatura, como se había mencionado se encuentra un sensor termopar “tipo K” el cual cuenta con rango de medición de -200°C a 1250°C, así mismo, tiene un estándar de límites error de $\pm 0.07\%$, así mismo las mediciones se recomienda realizarse en un ambiente de temperatura controlado.

Tabla. 1 Tabulación de mediciones

Temperatura (°C)	Voltaje (V)
1°C	0.03636V
11°C	0.4V
30°C	1.2V
43°C	1.7V
109°C	3.9V



Fig. 7 Mediciones de la señal eléctrica (temperatura)

Para el control de temperatura es posible cambiar los parámetros del sistema, tal como se muestra en la Fig. 8.

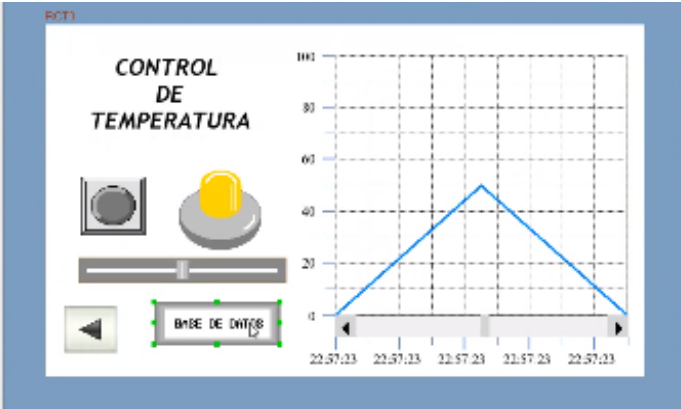


Fig. 8 Sección de la interfaz de temperatura HMI

En cuanto al subsistema de control de nivel, se utiliza un sensor de nivel TL231 con una alimentación de 24VCD y una salida en corriente normalizada de 4-20mA, en las mediciones de prueba, se ocuparon recipientes de una capacidad máxima de 20 litros como se muestra en la Tabla 2.

Tabla.2 Tabulación de Control de nivel HMI

Cantidad de fluido (L)	Tiempo de llenado (seg)
5 L	100 s
10 L	200 s
15 L	300 s
20 L	400 s

El aspecto del sistema de control de nivel del sistema diseñado se presenta en la Fig. 9.

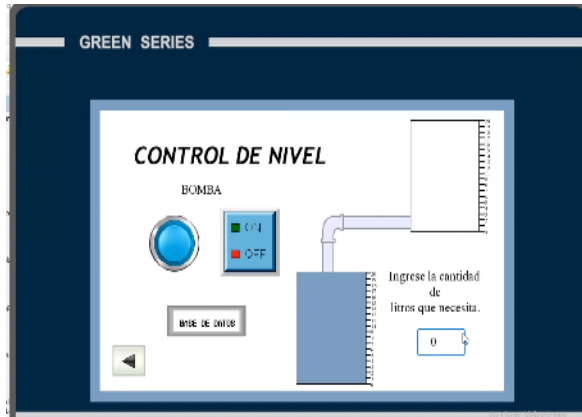


Fig.9 Sección de la interfaz de Control de nivel HMI

En cuanto al subsistema de control de posición del motor, se ocupó un Motor NEMA 34 controlado a través de un Driver, este a su vez es controlado por el PLC, las pruebas fueron realizadas con el encoder junto con sensores de posición; el sistema cuenta con un sistema de transmisión con relación de vueltas 3-1 tal como se muestra en la Fig. 11, el sistema tiene la capacidad de variar la velocidad a petición del usuario a través de un microcontrolador esclavo, alcanzando hasta 200 rpm's cuando el usuario selecciona el 100% de su capacidad como se muestra en la Fig.10.

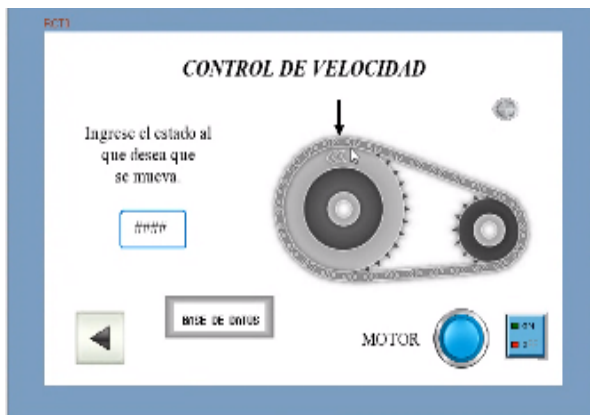


Fig.10 Interfaz HMI del control de velocidad

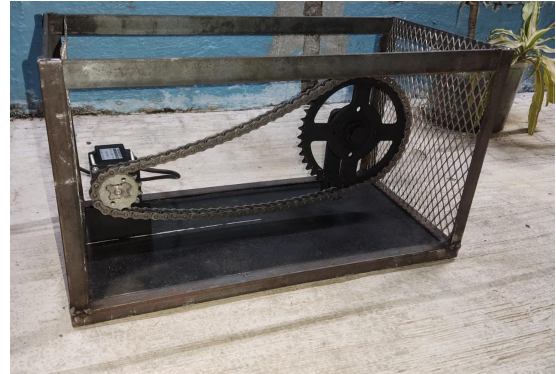


Fig.11 Estructura de control de velocidad

5. CONCLUSIONES

El sistema multivariable a través de su funcionamiento demostró que tiene la capacidad para ejecutar implementaciones de la industria de acuerdo a las necesidades requeridas en los procesos. Así mismo, la capacidad del sistema para ser utilizado a través de la HMI se permite otorgar el control/manipulación de variables otorgando la posibilidad de establecer al operador humano fuera del área operativa. Así mismo el sistema multivariable permite adquirir la información en línea con la capacidad de ajustar en todo momento a las condiciones que se requieren dentro del proceso productivo. Algunas de las ventajas que puede proveer es la precisión que ofrece por el tipo de sensores que se ocuparon, puesto que tiene poca variación y es seguro. Así como también algunas de las limitaciones que se encontraron fue que es difícil transportar por el tamaño al menos en el sistema de movimiento y nivel, y con el tiempo necesita calibración, mantenimiento para los sensores, además que algunos de los actuadores son costosos y poco comunes.

REFERENCIAS

- [1]García, S. (2020) Uso de cartas multivariables para la monitorización y optimización del mantenimiento de una plataforma eólica. Universidad del País Vasco. Bilbao.
- [2]Ochoa.J, Barceló.M, Cirett.F & Luque.R.(2018). Un modelo para desarrollar sistemas tipo SCADA en entornos productivos.Scielo.
- [3]Andrade, R.(2019).Módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua, mediante sistema SCADA, PLC y algoritmo PID. VOL. 4 NÚM. 2.
- [4]Cardona, A. B., & Ramos, T. G. (2018). Implicaciones de la automatización en el servicio al cliente y los puestos de cajeros en la industria bancaria. Trabajo y sociedad, (31), 183-201.

- [5]Loza Garzón, E. D., & Vergara Cumbal, G. F. (2018). Automatización de una máquina CNC para la fabricación de roscas personalizadas con control de calidad utilizando visión artificial (Bachelor's thesis).
- [6]Salazar Samaniego, D. K. (2018). *Trabajo muscular y su incidencia en las lesiones musculoesqueléticas en trabajadores de la industria metalmecánica* (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Maestría en Seguridad e Higiene Industrial y Ambiental).
- [7]Manzano, S., Vite, L., León-Mendoza, M., Villacis-Iza, M., & Andaluz-Espinosa, D. (2019). Revisión a la Seguridad de Sistemas de Control Industrial que utilizan PLC Siemens S7-1200. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E23), 302-313.

Métodos de Estimación de Impedancia de Red para Inversores Interconectados

Ing. Portia Astrea Cantera Gándara *

Dr. Jesús Darío Mina Antonio**

Dr. Abraham Claudio Sánchez ***

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) ; (e-mail: m22ce009@cenidet.tecnm.mx)

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) ; (e-mail: jesus.ma@cenidet.tecnm.mx)

***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) ; (e-mail:abraham.cs@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Distributed Generation (GD) integration presents challenges, such as inverter instability and voltage variations, due to the inherent impedance at the common connection point (PCC). To solve these problems, the estimation of the network impedance has been proposed, which can be determined based on the Voltage-Current measurements. This article provides an overview of grid impedance estimation techniques, including their classification and comparisons. Its objective is to present the general idea of grid impedance estimation.

Keywords: Distributed generation, Grid impedance estimation, Kalman filter, Observer, P/Q variation, pseudo random binary sequence, Smart inverter.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de fuentes de energía renovables conectadas a la red se ha incrementado enormemente en los últimos años, de ahí surge el término de la Generación distribuida (GD), se puede decir entonces que es: la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica [1].

La GD genera ventajas económicas y ambientales, sin embargo, se plantean distintos retos a la red, tales como: inestabilidad de inversores, variaciones de voltaje y distintas alteraciones que esto provoca, debidas, entre otras cosas, a la inherente impedancia que está presente en la red. Así que, para suprimir dicho problema, el inversor se ve obligado a poder estimar la impedancia de la red. Sin embargo, al implementar existen desafíos, como la precisión de la estimación, y el hecho de que ésta es cambiante. Los cambios en la impedancia de red se deben, entre otros, a un fallo o a la desconexión de una línea de transmisión, o a la incorporación de nuevas cargas y/o de nuevos GDs.

Por ello, recientemente se han propuesto métodos de identificación en línea de la impedancia de red. En este contexto, el objetivo de este artículo es describir y analizar las técnicas publicadas con el fin de dar a conocer las características generales para la estimación de impedancia de red. Este artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 ofrece una vista general de la impedancia de red, la clasificación de técnicas se muestra en la sección 3; posteriormente, la sección 4 ofrece los resultados que se han reportado en la bibliografía, y por último la conclusión se encuentra en la sección 5.

2. IMPEDANCIA DE RED

2.1 Modelado de la impedancia

Para facilitar el análisis y la investigación, es necesario modelar la impedancia de la red (Fig. 1).

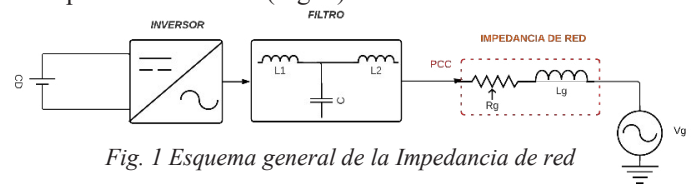


Fig. 1 Esquema general de la Impedancia de red

$$Z_g = R_g + j\omega L_g$$

Donde:

Z_g = Impedancia de red.

R_g =Resistencia de red.

L_g =Inductancia de red.

2.2 Usos de la impedancia de red

La estimación de impedancia es útil para la detección de islas, el control de voltaje, el soporte de la potencia reactiva, el desacoplamiento de los lazos de corriente internos en el marco de referencia síncrono, control robusto de los inversores conectados a la red.

2.3 Problemas de la impedancia de red

La existencia de impedancia en la red afecta y disminuye el rendimiento del inversor y el control, puesto que puede originar un cambio de los valores en la relación de voltaje-potencia, que podrían salirse de los límites normativos y generar inestabilidad, además de una pérdida en la calidad de la señal ya que también modifica la dinámica que se tiene con el filtro.

3. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE IMPEDANCIA DE RED

Dichos problemas podrían mitigarse al permitir que los inversores calculen la impedancia de la red mediante la inclusión de una técnica de estimación en su circuito de control. La bibliografía reporta, para la estimación en línea de la impedancia de red, la siguiente clasificación (Fig. 2).

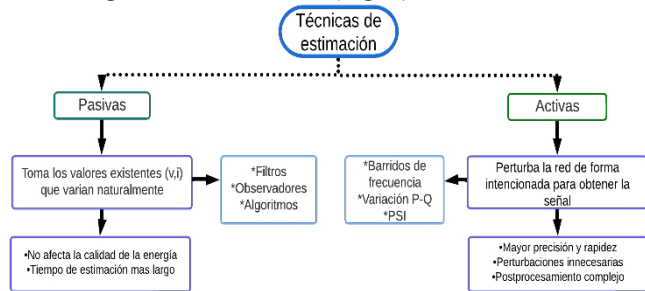


Fig. 2 Clasificación de técnicas de estimación de impedancia

4. RESULTADOS

En la Figura 3, el filtro Kalman igual que la técnica de mínimos cuadrados recursivos, no se requiere inyección de alguna señal adicional. Se toman valores de voltaje y corriente actuales, y mediante la minimización del error, la estimación se hace de manera recursiva, (Fig. 4).

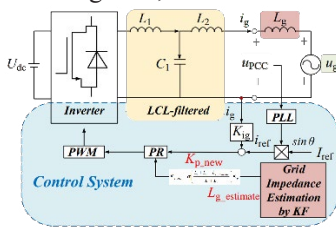


Fig. 3 Esquema de la estimación con Filtro Kalman [2]

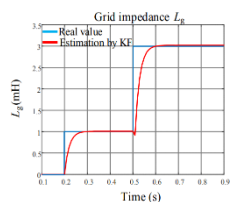


Fig. 4 Estimación con Filtro Kalman [2]

La siguiente técnica identifica las variaciones Δid y Δvd , toma muestras en 2 instantes de tiempo mediante un estimador de secuencia positiva, las almacena, compara y calcula la impedancia, aunque necesita una gran memoria computacional. (Fig. 5).

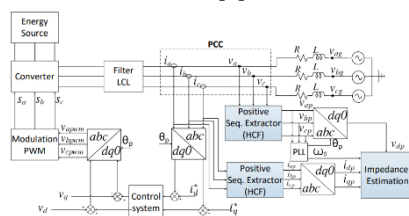


Fig. 5 Esquema de la estimación mediante Variaciones de potencia d-q [3]

En la Figura 6 la técnica inyecta una señal de baja magnitud, a una frecuencia específica generalmente de 2 a 150 kHz, la estimación se puede hacer por procesamiento de señales (e.g. DFT-Discret Fourier Transform) o mediante observadores, siendo una de las más precisas y rápidas.

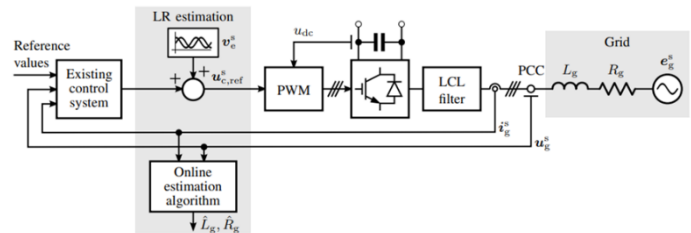


Fig.6 Esquema de la estimación mediante DFT [4]

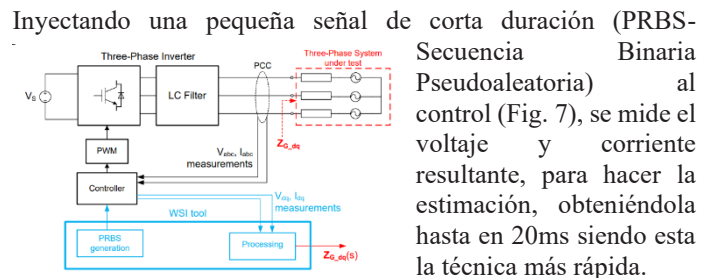


Fig. 7 Esquema de la estimación inyectando PRBS [5]

5. CONCLUSIÓN

El conocimiento de la impedancia de red, para los inversores interconectados, tiene diferentes usos, como: detección de isla, adaptación de controladores, funciones auxiliares como soporte de voltaje, etc. En este contexto, es importante conocer y seleccionar las técnicas de estimación de impedancia, que mejor se adecuen a la aplicación específica, e.g. que permitan o no perturbaciones adicionales y/o que requieren una estimación off-line u on-line (recursiva).

REFERENCIAS

- [1] Martin, F., "El papel de los recursos energéticos distribuidos y las redes inteligentes ". Santiago, Chile CONUEE, 2015.
- [2] Y. Cheng, W. Wu, H. Chung , and B. F. , " Using Kalman Filter to Achieve Online Estimation of Equivalent Grid Impedance and High Bandwidth Control for LCL-Filtered Grid-tied Inverters," IEEE, 2020.
- [3] H. M. Jose H., Luan s., "An Improved Impedance Estimation Method Based on Power Variations in Grid-Connected Inverters," IEEE Access, 2020.
- [4] J. Kukkola, M. Routimo, and M. Hinkkanen, "Real-Time Grid Impedance Estimation Using a Converter," presented at the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019.
- [5] Riccobono, A., M. Mirz, and A. Monti, Noninvasive Online Parametric Identification of Three-Phase AC Power Impedances to Assess the Stability of Grid-Tied Power Electronics Inverters in LV Networks. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018. 6(2): p. 629-647.

Esquema de detección de ataques en sistemas ciber-físicos utilizando banco de observadores

A.-R. Guadarrama-Estrada * G.-L. Osorio-Gordillo *
C.M. Astorga-Zaragoza *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado
Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.
e-mail: d19ce018@cenidet.tecnm.mx*

Resumen. This article presents the design of an observer bank for detecting attack patterns in cyber-physical systems. Various attack schemes such as DoS, IDF, and IDA are addressed. Additionally, the usefulness of model-based techniques using Markovian logic to understand attacker behavior and improve attack scheme action is mentioned. The observer bank has a Luenberger-type structure that allows for the detection of alterations in the input and output of the cyber-physical system. A case study involving an interconnected three-tank system will be used.

Palabras clave: Observador tipo Luenberger, Ataque de Denegación de Servicio, Ataque de Inyección de Datos Falsos, Ataque de Inyección de Datos Aleatorios, Procesos Estocásticos Markovianos, Sistema Ciber-físico

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas ciber-físicos (CPS) se han convertido en una parte fundamental de la automatización en la industria. Debido a que las aplicaciones de los sistemas ciber-físicos están presentes en diversos campos de la ingeniería, como en redes inteligentes, sistemas de distribución de agua, transporte inteligente, plantas industriales, como lo son las refinerías de petróleo, plantas químicas, plantas generadoras de energía eléctrica, granjas y hasta monitoreos médicos (Baheti and Gill, 2011; Rieger et al., 2012). Los sistemas ciber-físicos son generalmente divididos en dos partes: la capa física, la cual está integrada por una capa de sensores y actuadores, así como de un sistema (eléctrico, robótico, mecánico, etc.). Esta parte tiene como objetivo la aplicación y recopilación de información generada por el comportamiento del sistema físico. Por otra parte, la capa cibernética está formada por la red de control que se encarga de tomar las decisiones y definir el comportamiento que tendrá el sistema físico, así como la infraestructura de comunicación, la cual tiene como objetivo transmitir los datos adquiridos y la señal de control a los actuadores. Sin embargo, la creciente dependencia de los CPS también ha llevado a un aumento en los riesgos de seguridad cibernética (Cao et al., 2013; Hu, 2014; Lee et al., 2015). Algunos de los esquemas de ataques reportados en la literatura son, desde el clásico ataque de denegación de servicio (DoS) hasta la inserción de datos falsos (IDF) y aleatorios (IDA).

El impacto de los ataques a sistemas ciber-físicos puede ser grave debido a que pueden ser, desde la interrupción de las operaciones hasta la pérdida de datos críticos y la exposición a la información confidencial. Como resultado, para detectar dichos ataques de manera efectiva, es necesario contar con herramientas especializadas, y una de ellas es el banco de observadores. Un banco de observadores es un sistema de monitoreo que permite analizar el comportamiento del sistema en tiempo real (Isermann, 1995). Estas herramientas pueden detectar patrones anómalos en el comportamiento del sistema, lo que indica la presencia de un ataque en la entrada o salida del sistema.

Es importante destacar que los esquemas de ataque DoS, IDF e IDA son típicamente llevados a cabo mediante la manipulación de información o la interrupción de servicios. En este sentido, la utilización de técnicas de modelado basadas en lógica Markoviana puede ser útil para entender la complejidad del comportamiento del atacante y mejorar la dinámica de los esquemas de ataque (Li et al., 2014; Liu et al., 2017).

La lógica Markoviana es una técnica matemática que permite modelar sistemas en los que el estado futuro del sistema depende solamente del estado actual y no de su historia pasada (Li et al., 2018). Esta técnica se ha utilizado ampliamente en el análisis del comportamiento de sistemas, y puede ser aplicada para modelar el comportamiento de los atacantes en los esquemas de ataque mencionados previamente.

Finalmente, la principal contribución de este artículo es diseñar un banco de observadores con estructura de observador tipo Luenberger que permitirá la detección de los esquemas de ataque DoS, IDF e IDA con lógica Markoviana para sistemas ciber-físicos. Para aplicar dicho esquema de detección se utilizará como caso de estudio un sistema de tres tanques interconectados que es sometido a los ataques de los diferentes esquemas mencionados anteriormente (Bezzaoucha Rebaï et al., 2018). Los resultados obtenidos muestran que el banco de observadores diseñado es capaz de detectar los ataques de manera efectiva, lo que demuestra su utilidad y eficacia en la detección de señales anómalas dirigidas a los sistemas ciber-físicos.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considera un sistema lineal discreto (1) con las características propias de los sistemas ciber-físicos, en el cual la entrada y salida del sistema se muestrean en momentos discretos de tiempo debido a que se considera que la señal de entrada y salida son enviadas de forma remota:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ es la entrada del sistema, $y(k) \in \mathbb{R}^p$ representa las variables de salida medidas. Las matrices $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$, son conocidas.

Para diseñar el banco de observadores, se asume que el sistema cumple con la propiedad de la observabilidad.

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (2)$$

La observabilidad ayuda a comprobar si la función lineal de los estados del sistema puede ser estimada, a partir de la información disponible de la entrada y salida del sistema.

La Figura 1 muestra la estructura de un banco de observadores dedicados (DOS) para aislar p ataques en sensores, se diseñan p observadores, de tal manera que el observador i utiliza todas las entradas y solo la salida y_i . Así, cada observador es sensible solo al i -ésimo ataque.

Considere el observador con estructura tipo Luenberger para el sistema lineal discreto (1)

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L[y(k) - \hat{y}(k)] \quad (3)$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \quad (4)$$

Se define $\hat{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ que representa los estados estimados por el observador, $\hat{y}(k) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de estimación de la salida y L es la ganancia del observador, donde A, B y C son matrices conocidas de dimensiones apropiadas.

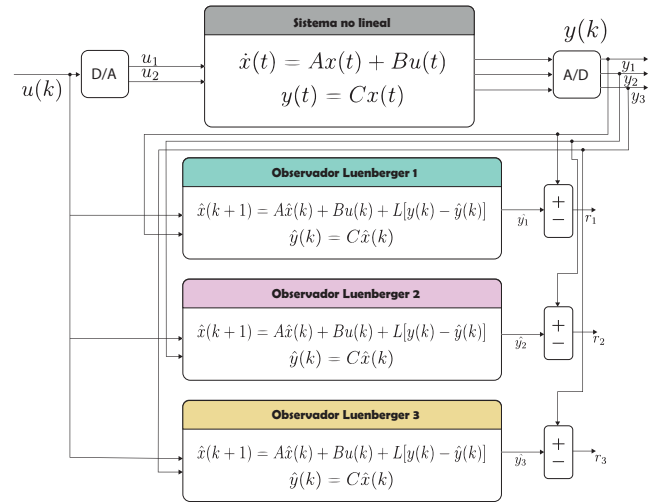


Figura 1. Esquema del banco de observadores

Considere el vector de error de estimación dado por $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, de modo que la dinámica del error de estimación es expresada como:

$$e(k+1) = x(k+1) - \hat{x}(k+1) \quad (5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) y (4), en (5) se obtiene:

$$e(k+1) = Ax(k) + Bu(k) - A\hat{x}(k) - Bu(k) - L(y(k) - C\hat{x}(k)) \quad (6)$$

la ecuación (6) se puede simplificar a la forma siguiente:

$$e(k+1) = \underbrace{(A - LC)}_{A_L} e(k) \quad (7)$$

3. FORMULACIÓN DE ESQUEMAS DE ATAQUE

En esta sección, se definirán cada uno de los esquemas de ataques que se considerarán.

3.1 Ataques de denegación de servicio (DoS)

Este tipo de ataque busca impedir la transmisión de datos en el sistema de control o de sensado, que puede ser lanzado mediante la interferencia de los canales de comunicación, saturación de paquetes de datos en la red, etc.

Los esquemas de ciber-ataques a sensor y actuador tienen la siguiente forma:

$$\begin{aligned} a^s(k) &= -x(k) \\ a^a(k) &= -u(k) \end{aligned} \quad (8)$$

Utilizando la ecuación del sistema (1) en conjunto con la ecuación del ataque en sensor y actuador (8) se obtiene:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + \alpha(k)F_1a_s(k) \\ y(k) &= Cx(k) + \beta(k)F_2a_s(k) \end{aligned} \quad (9)$$

donde $a_a(k) \in \mathbb{R}^r$ denota el ciber-ataque del actuador y $a_s(k) \in \mathbb{R}^m$ denota el ciber-ataque del sensor. A, B, C, F_1 y F_2 son matrices constantes conocidas. $\alpha(k)$ y $\beta(k)$ se refiere a los procesos estocásticos Markovianos que toman los valores de 0 y 1.

3.2 Ataque de inserción de dato falso

El objetivo de este tipo de ataque es afectar al sensor o al actuador, iniciando por el ataque al sensor este hace que la lectura del sensor sea diferente de la señal real de lectura de datos. Por otra parte, el ataque dirigido al actuador busca sustituir la señal de control para nuestro sistema, generando la inestabilidad del mismo. Cuando el sistema (1) se ve afectado por el ataque de inyección de datos falsos, las ecuaciones (8) cambian de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} a_s(k) &= -x(k) + b_s(k) \\ a_a(k) &= -u(k) + b_a(k) \end{aligned} \quad (10)$$

donde $b_a(k)$ y $b_s(k)$ son datos engañosos que el adversario intenta lanzar sobre el actuador y el sensor, respectivamente. Sustituyendo la ecuación (10) en (9) obtenemos:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) - \alpha(k)F_1u(k) + \alpha(k)F_1b_a(k) \\ y(k) &= Cx(k) - \alpha(k)F_2x(k) + \alpha(k)F_2b_s(k) \end{aligned} \quad (11)$$

3.3 Ataque de inserción de dato aleatorio

Este tipo de ataque tiene como objetivo hacer que la lectura del sensor o señal del controlador sea diferente del valor real. Recordemos que el ataque de inserción de datos aleatorio parte de que no se tiene un conocimiento completo del sistema que se ataca a diferencia del ataque de dato falso. Entonces, el sistema de tres tanques afectado por el esquema de ataque de inserción de dato aleatorio, tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} a_s(k) &= \pm b_s(k) \\ a_a(k) &= \pm b_a(k) \end{aligned} \quad (12)$$

Sustituyendo la ecuación (12) en (9) obtenemos:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \pm \alpha(k)F_1b_a(k) \\ y(k) &= Cx(k) \pm \alpha(k)F_2b_s(k) \end{aligned} \quad (13)$$

Finalmente planteamos la siguiente clasificación de los distintos esquemas de ataque a utilizar teniendo una clasificación por tipo de ataque, seguido de una subclasificación por la lógica de ataque y una más particular que los divide por ubicación de aplicación del esquema de ataque. Cabe recordar que se utilizarán solamente los esquemas de ataque dirigidos a los sensores.

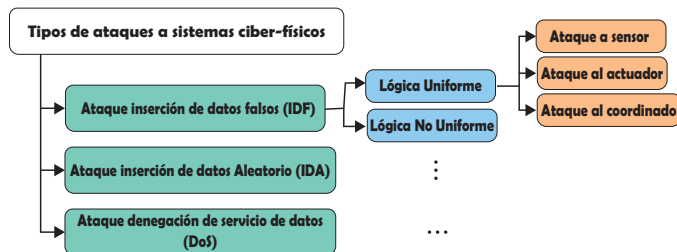


Figura 2. Tipos de ataques y estructura

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL OBSERVADOR

En esta sección se lleva a cabo análisis de estabilidad de la dinámica del error de estimación de la Ecuación (7).

Considere la siguiente función de Lyapunov:

$$V(e(k)) = e^T(k)Pe(k) > 0 \quad (14)$$

donde $P > 0$. La variación de $V(e(k))$ a lo largo de la solución de (7) es

$$\begin{aligned} \Delta V(e(k)) &= V(e(k+1)) - V(e(k)) \\ &= e^T(k+1)Pe(k+1) - e^T(k)Pe(k) \end{aligned} \quad (15)$$

reemplazado $e(k+1)$ de la ecuación (7), se obtiene

$$\Delta V(e(k)) = e^T(k) [(A-LC)^T P(A-LC) - P] \varphi(k) \quad (16)$$

La desigualdad $\Delta V(\varphi(k)) < 0$ se cumple si

$$(A-LC)^T P(A-LC) - P < 0, \quad (17)$$

Aplicando el complemento de Schur (Boyd et al., 1994) en la desigualdad (17) se tiene

$$\begin{bmatrix} -P & (A-LC)^T P \\ P(A-LC) & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

Resolviendo la desigualdad matricial lineal (LMI) dada por la ecuación (18) se pueden obtener los valores para la matriz L .

5. CASO DE ESTUDIO

5.1 Modelo de un sistema de tres tanques interconectados

Los sistemas de tanques interconectados son una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos químicos. Estos sistemas consisten en varios tanques que están conectados entre sí a través de tuberías y válvulas. El objetivo de estos sistemas es controlar el nivel de líquido en los tanques, como se muestra en la Figura 3.

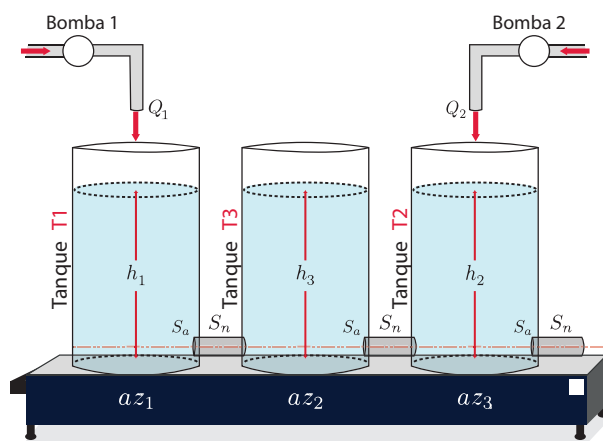


Figura 3. Esquema caso de estudio (Tres tanques interconectados)

El modelo lineal en tiempo discreto es el siguiente :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (19)$$

Definimos las variables: $x(k) = \begin{bmatrix} h_1(k) \\ h_2(k) \\ h_3(k) \end{bmatrix}$, $u(k) = \begin{bmatrix} Q_1(k) \\ Q_2(k) \end{bmatrix}$,

$$y(k) = \begin{bmatrix} h_1(k) \\ h_2(k) \\ h_3(k) \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_a} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_a} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} \\ 0 & A_{21} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = -\frac{az_1 S_n g}{S_a \sqrt{2g(h_1(t) - h_3(t))}}, A_{13} = -\frac{az_1 S_n g}{S_a \sqrt{2g(h_1(t) - h_3(t))}}$$

$$A_{21} = -\frac{az_3 g S_n}{S_a \sqrt{2g(h_3(t) - h_2(t))}}, A_{23} = -\frac{az_2 g S_n}{S_a \sqrt{2g(h_3(t) - h_2(t))}}$$

$$A_{23} = -\frac{az_3 g S_n}{S_a \sqrt{2g(h_3(t) - h_2(t))}}, A_{31} = \frac{az_1 S_n g}{S_a \sqrt{2g(h_1(t) - h_3(t))}}$$

$$A_{32} = -\frac{az_3 g S_n}{S_a \sqrt{2g(h_3(t) - h_2(t))}}$$

$$A_{33} = -\frac{az_1 g S_n}{S_a \sqrt{2g(h_1(t) - h_3(t))}} - \frac{az_3 g S_n}{S_a \sqrt{2g(h_3(t) - h_2(t))}}$$

T es el tiempo de muestreo, az_1 , az_2 y az_3 son coeficientes de salida que toman valores de 0 a 1; $Q_1(k)$ y $Q_2(k)$ son los caudales de la bomba 1 y la bomba 2, respectivamente.

6. PARAMETRIZACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

En esta sección se presenta la simulación del sistema de tres tanques interconectados. El objetivo es analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación. Para ello, se han establecido los valores de los parámetros del sistema, los cuales se muestran en la Tabla.1 [Li et al. \(2018\)](#).

Tabla 1. Parámetros primera simulación

Parámetro	Valor	Unidades	Definición
S_a	0.0154	m^2	Sección transversal del Tanque
S_n	5×10^{-5}	m^2	Sección transversal del Tubo
g	9.8	m^2/s	Gravedad
Q_1	0.02	m^3/s	Flujo de entrada 1
Q_2	0.03	m^3/s	Flujo de entrada 2
H_{max}	0.8	m	Altura máxima de los tanques
az_1	0.46		Coefficiente de salida tanque 1
az_2	0.58		Coefficiente de salida tanque 2
az_3	0.48		Coefficiente de salida tanque 3

Se procede al diseño de las señales de entrada que se utilizarán en la simulación del sistema de tres tanques interconectados. Para esto, se emplearon dos señales variables de entrada diseñadas mediante la herramienta Signal Builder del programa Matlab. Utilizar señales variables proporciona información más detallada sobre cómo un sistema responde a los diferentes esquemas de ataque. Las señales de entrada resultantes se muestran en la Figura. 4.

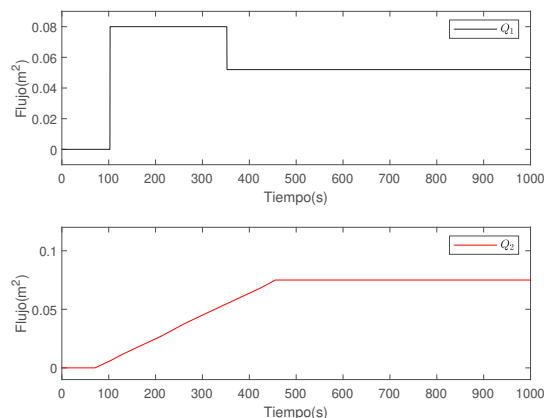


Figura 4. Entradas de flujo variable

A continuación, se procede a generar las señales de lógica Markoviana para los esquemas de ataque. En primer lugar, se genera la señal de acción uniforme (línea roja), que se caracteriza por tener un período de activación constante. Después, se genera la versión no uniforme de esta señal (línea azul en la misma figura), que busca afectar la señal de lectura de los sensores. En la Figura 5 se pueden visualizar dichas señales.

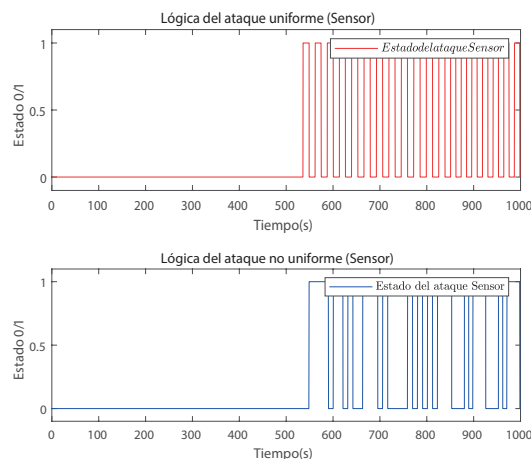


Figura 5. Lógicas Markovianas ataque al sensor

En la siguiente sección se presentarán algunas combinaciones de los distintos esquemas de ataque con lógica uniforme o no uniforme, y con enfoque en uno o múltiples sensores. Además, se incluirá una tabla con los residuos resultantes para cada una de las simulaciones realizadas.

7. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la simulación del sistema de tres tanques interconectados bajo los distintos esquemas de ataque abordados comenzando por el ataque tipo dos con lógica uniforme.

En particular, se examina el efecto del ataque en el sensor 1 del sistema, se utilizan los parámetros de la Tabla.1, la señal de entrada de la Figura.4, también se utilizó un paso de integración de $T_e = 0,01$ y un tiempo de discretización de $T = 0,001$ y una lógica Markoviana uniforme.

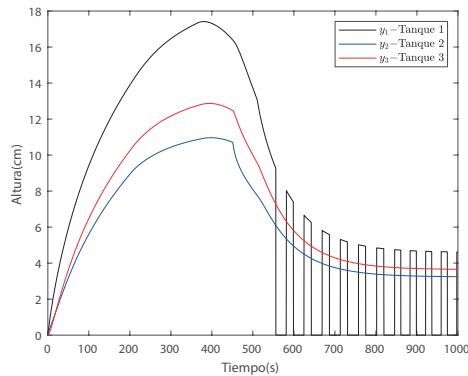


Figura 6. Comportamiento ante ataque DoS en la salida y_1

En la Figura.6 se puede observar el efecto del ataque de denegación de servicio (DoS) en la salida del sistema. Además, en la Figura 7 se presentan los residuos generados por el banco de observadores.

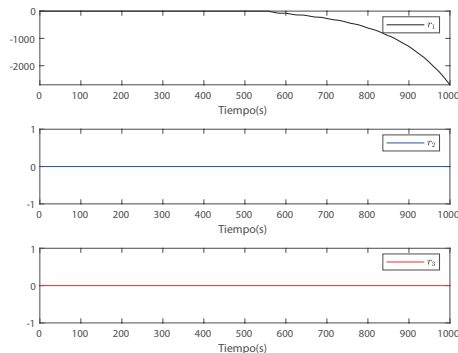


Figura 7. Residuos generados ante ataque tipo DoS

En la siguiente simulación se buscará analizar cómo el banco de observadores responde a un esquema de ataques de tipo IDF dirigido a la salida y_2 , este esquema consiste en inyectar datos falsos, con el fin de modificar el comportamiento del sistema ciber-físico. La lógica no uniforme del ataque significa que su intensidad y frecuencia de activación no son constantes, lo que lo hace más difícil de detectar y neutralizar.

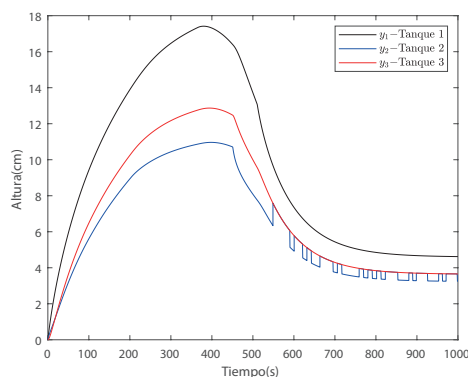


Figura 8. Comportamiento ante ataque IDF en la salida y_2

En la Figura 8 se muestra el efecto del ataque tipo IDF a la salida del sistema. Así, también en la Figura.9 se muestran los residuos generados por el banco de observadores.

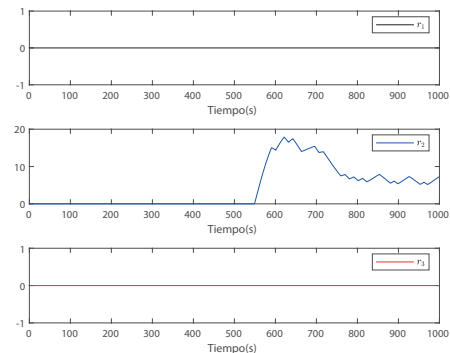


Figura 9. Residuos generados ante ataque tipo IDF

La siguiente simulación tiene como objetivo analizar la respuesta del sistema ante un esquema de ataque tipo IDA con lógica no uniforme con un efecto en la salida y_1 y y_2 del sistema ciber-físico.

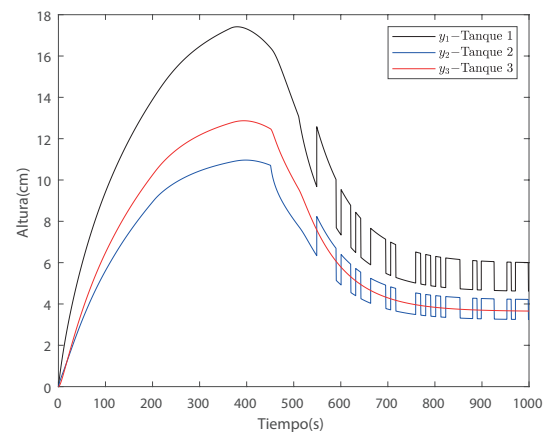


Figura 10. Comportamiento ante ataque IDA en las salidas y_1 y y_2

En la Figura 10 se muestra el efecto del ataque tipo IDA a la salida del sistema. Así, también en la Figura.11 se muestran los residuos generados por el banco de observadores.

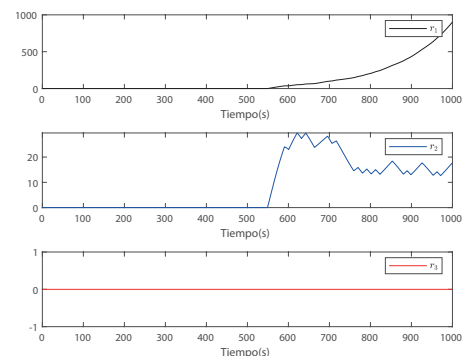


Figura 11. Residuos generados ante ataque tipo IDA

A continuación se muestra la tabla de residuos de todas las simulaciones realizadas con los distintos esquemas de ataque y lógicas de ataque.

Tabla de residuos (Ataques en sensor)							
Uniforme							
Ataque tipo DoS							
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	-	-	0	-
r_2	0	-	0	-	0	-	-
r_3	0	0	-	0	-	-	-
No uniforme							
Ataque tipo DoS							
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	r_2	0	0	-	-	0	-
r_2	r_3	-	0	-	0	-	-
r_3	0	0	-	0	-	-	-
Tabla de residuos (Ataques en sensor)							
Uniforme							
Ataque tipo IDF							
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	-	-	0	-
r_2	0	+	0	+	0	+	+
r_3	0	0	-	0	+	-	-
No Uniforme							
Ataque tipo IDF							
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	-	-	0	-
r_2	+	0	0	+	0	+	+
r_3	0	0	-	0	-	-	-
Tabla de residuos (Ataques en sensor)							
Uniforme							
Ataque tipo IDA							
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	+	0	0	+	+	0	+
r_2	0	+	0	-	0	+	-
r_3	0	0	-	0	+	+	+
No uniforme							
Ataque tipo IDA							
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	+	-	0	-
r_2	0	+	0	+	0	-	-
r_3	0	0	+	0	+	+	+

La tabla presentada muestra los resultados de simulaciones realizadas con diferentes esquemas de ataque y lógicas de ataque dirigidos a los sensores del sistema. Específicamente, la tabla indica el impacto de cada combinación y tipo de esquema de ataque en cada residuo, representado mediante un valor de cero, un signo negativo o un signo positivo. Un valor de cero indica que la combinación y tipo de esquema de ataque no tienen ningún efecto en ese residuo, mientras que un signo positivo indica un aumento positivo en el residuo y un signo negativo indica un efecto contrario.

8. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño de un banco de observadores para la detección de distintos esquemas de ataque dirigidos a los sensores del sistema ciber-físico. Primeramente se comprobaron las condiciones de estabilidad de los observadores mediante LMIs, utilizando

la técnica de complemento de Schur para encontrar una solución factible de las LMIs. En cuanto al caso de estudio se tomó un sistema de tres tanques interconectados con la característica de ser desarrollado en tiempo discreto debido a que es considerado un sistema ciber-físico.

Finalmente para constatar se llevó a cabo la simulación de distintos escenarios de ataque con una entrada variable y se obtuvo una tabla de residuos para visualizar el efecto de los esquemas de ataque con distintos objetivos.

REFERENCIAS

- Baheti, R. and Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. *null*. doi: null.
- Bezzaoucha Rebaï, S., Voos, H., and Darouach, M. (2018). Attack-tolerant control and observer-based trajectory tracking for cyber-physical systems. *European Journal of Control*, 47. doi:10.1016/j.ejcon.2018.09.005.
- Boyd, S., Ghaoui, L., Feron, E., and Balakrishnan, V. (1994). *Linear matrix inequalities in systems and control theory*. SIAM.
- Cao, X., Cheng, P., Chen, J., and Sun, Y. (2013). An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1), 439–450. doi:10.1109/TII.2012.2216537.
- Hu, F. (2014). *Cyber-physical systems:book*. Taylor & Francis Group LLC.
- Isermann, R. (1995). *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer.
- Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H.A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. doi:https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X>.
- Li, H., He, X., Zhang, Y., and Guan, W. (2018). Attack detection in cyber-physical systems using particle filter: An illustration on three-tank system. In *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 504–509. doi:10.1109/CYBER.2018.8688281.
- Li, Y., Voos, H., Rosich, A., and Darouach, M. (2014). A stochastic cyber-attack detection scheme for stochastic control systems based on frequency-domain transformation technique. doi:10.13140/2.1.4965.7286.
- Liu, S., Xu, B., Li, S., and Liu, Y. (2017). Resilient control strategy of cyber-physical system under dos attacks. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 7760–7765. doi:10.23919/ChiCC.2017.8028584.
- Rieger, C., Zhu, Q., and Başar, T. (2012). Agent-based cyber control strategy design for resilient control systems: Concepts, architecture and methodologies. In *2012 5th International Symposium on Resilient Control Systems*, 40–47. doi:10.1109/ISRCS.2012.6309291.

Desarrollo de una Plataforma de un videojuego para la rehabilitación pulmonar

Teódulo Israel Castañeda-Rodríguez^{*a}, Rubén Posada-Gómez^{**b}
Arturo Alvarado-Lassmann^{**c}, Albino Martínez-Sibaja^{*d}, Alberto A. Aguilar-Lasserre^{**e}

^{*} Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba Veracruz, CP 94320 México

^{**} Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba/CRODE/ Orizaba Veracruz, CP 94320 México

a(Tel: 2721750545; e-mail: israel.casrod96@gmail.com).

b(e-mail: ruben.pg@crodeorizaba.tecnm.mx).

c(e-mail: arturo.al@crodeorizaba.tecnm.mx).

d(e-mail: albino3_mx@yahoo.com).

e(e-mail: albertoaal@hotmail.com).

Resumen: En el presente artículo se abordarán los avances obtenidos sobre el desarrollo de la plataforma de juegos y del dispositivo que permitirá interactuar con esta misma, logrando así facilitar la rehabilitación pulmonar. Esta herramienta tiene como propósito ayudar en la recuperación de las personas que padecen las secuelas producidas por el COVID-19 mediante la estimulación del esfuerzo-recompensa visualizada en la interfaz. Este trabajo pretende contribuir en el área de la rehabilitación pulmonar como un método alternativo que permita la recuperación física de manera más rápida y eficiente a comparación de los métodos utilizados en este campo.

Palabras claves: Rehabilitación, herramienta computacional, juegos serios, espirometría, Unity

1. INTRODUCCIÓN

Con la llegada del coronavirus 2019 (COVID-19) las personas que fueron afectadas por este han tenido repercusiones al momento de recuperarse de dicha enfermedad, el estado físico y pulmonar de los pacientes están ligados a la gravedad con la que afectó a sus cuerpos, la neumonía por coronavirus está dividida clínicamente en leve, normal, grave y aguda. El tratamiento convencional y los procedimientos de manejo cuando se está hospitalizado pueden ocasionar lesiones fibróticas pulmonares residuales afectando de gran manera la función respiratoria y su recuperación durante la rehabilitación (Suárez S, 2020).

Se demostró que la función pulmonar mejoro de manera considerable aplicando rehabilitación respiratoria después de un plazo de 6 semanas tomando como muestra a 36 adultos mayores que había pasado por el COVID-19, tomando como marco de referencia una sesión de caminata con una duración de 6 minutos. Este estudio demostró que la ansiedad y la depresión generadas por la fase de aislamiento se ven disminuidas ligeramente con esta rehabilitación (Liu *et al.*, 2020).

La aplicación de los videojuegos en el área de la rehabilitación demuestra que la recuperación de la persona afectada es más rápida, incrementando así la estimulación positiva por continuar y/o concluir las terapias aplicadas por los especialistas como es el caso de los pacientes con la enfermedad de Parkinson, también a los que han sufrido un

ictus o incluso educar a las personas que padecen asma. Todos ellos han mostrado una mejoría significativa en su recuperación tanto física como emocionalmente disminuyendo los niveles de depresión y ansiedad (Gallego Tuñón, 2016).

Esto permite que los videojuegos en materia de rehabilitación se vuelvan parte de las terapias que permitan a las personas recuperar su capacidad respiratoria normal, logrando así reincorporarse a su estilo de vida diaria.

1.1 Elección del espirómetro

Para que el juego pueda cumplir con su propósito necesita de un dispositivo que funcione como el medio de comunicación entre la maquina y el usuario, el instrumento que puede realizar este trabajo es un espirómetro, por lo que se analizan los parámetros generales con los que debe contar un de estos, los cuales son volumen, flujo y tiempo, por lo que están clasificados en dos tipos (García-Río *et al.*, 2013; Giner, Burgos and SIBELMED, 2014):

- Espirómetro volumétrico o cerrado: tiene una sola entrada de aire, el resto del equipo de encuentra sellado por lo que permite registrar el total de aire inhalado o exhalado en un tiempo determinado.
- Espirómetro de flujo o abierto: se encuentra abierto por ambos extremos, midiendo la velocidad del aire inhalado o exhalado en un periodo de tiempo determinado.

Para este trabajo se optó por un espirómetro de flujo, dentro de esta categoría existen varias versiones unas más complejas y precisas que otras por lo que sus resultados pueden verse afectados por factores externos, como lo son la temperatura y presión ambiental tal es el caso de las versiones Fleisch, lilly, de hilo caliente o termistores teniendo que realizar una compensación para cada prueba espirométrica, caso contrario a la versiones de turbina y ultrasónicas que no se ven afectadas por este tipo de factores, dejando como los candidatos más prometedores a estos últimos (Vázquez García and Pérez Padilla, 2018).

La elección del formato de turbina (Fig. 1) fue la más prometedora debido al método que implementa para realizar una prueba espirométrica, el cual se basa en la velocidad de giro de las aspas o pala giratoria siendo este proporcional al flujo que atraviesa al instrumento, viéndose reflejado en la cantidad de componentes electrónicos que lo conforman, su tamaño y costo de manufactura, agregando que otra de sus ventajas es que la propia turbina puede ser intercambiable en caso de ser necesario sin comprometer al resto del artefacto, sin embargo cuenta con una desventaja la cual se presenta cuando el flujo de aire se mueve extremadamente lento provocando que la precisión se vea afectada por una lectura intermitente de información.

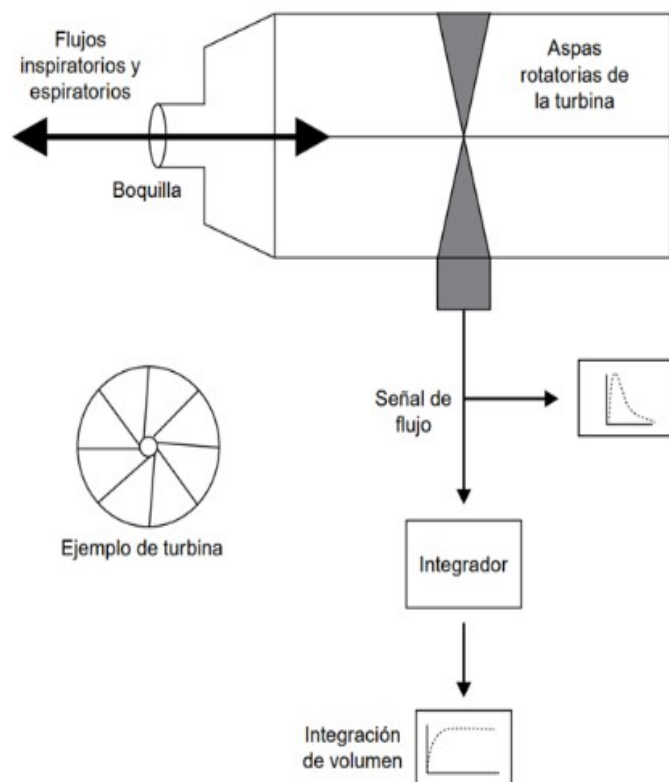


Fig. 1. Principio de funcionamiento de un espirómetro de turbina.

1.2 Requerimientos para un espirómetro de turbina

Con el tipo de espirómetro ya definido se procede a determinar los requerimientos mínimos con los que debe contar todo espirómetro durante una prueba espirométrica o durante una sesión de rehabilitación pulmonar (Miller *et al.*, 2005).

- Registro de tiempo espiratorio mínimo de 15 segundos.
- Capacidad de medir volúmenes de 0.5 a 8 litros en condiciones BTPS (temperatura corporal, presión barométrica, saturación de vapor de H₂O), con una exactitud de $\pm 3\%$ o 0.050 L (la que resulte superior).
- Capacidad de medir flujos de entre 0 y 14 L/s con una sensibilidad de 200 mL/s.
- Una pantalla digital que presente las gráficas de flujo-volumen (F/V) y volumen-tiempo (V/T), idealmente en tiempo real e invariable al momento de la generación del reporte espirométrico (Fig. 2).
- Período de 0.25 segundos antes del inicio de la maniobra para valorar volumen extrapolado.
- Para el informe de ambas graficas (F/V y V/T) se recomienda una escala de volumen ≥ 10 mm/L y de tiempo ≥ 20 mm/s.

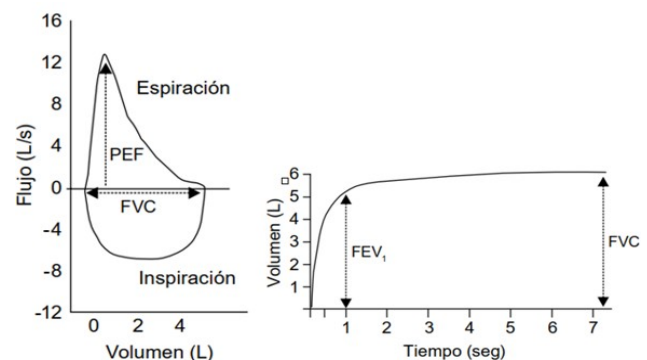


Fig. 2. Izquierda grafica de flujo-volumen, derecha grafica de volumen-tiempo.

1.3 Selección de los componentes electrónicos

La selección de los componentes depende directamente de la forma en la que se comporta el dispositivo, por lo tanto, el mecanismo principal de la turbina (la pala giratoria o aspa que entra en contacto con el flujo de aire) es un elemento con un comportamiento rotacional, llegando a la conclusión de que el método más eficiente para cuantificar las revoluciones es un encoder óptico.

El encoder está compuesto por el emisor el cual es un "L.E.D." (diodo emisor de luz por sus siglas en inglés) de luz infrarroja "I.R." y el receptor es un fotodiodo de luz "I.R." (Fig. 3), la elección de los componentes con características "I.R." es debido a que el instrumento estará expuesto a luz ambiental

visible por lo que es necesario reducir las interferencias al mínimo.



Fig. 3. “L.E.D.” infrarrojo (azul), Fotodiodo Infrarrojo (negro).

El propósito de un encoder óptico es generar un pulso eléctrico cuando la pala giratoria pasa entre el emisor y el receptor, dependiendo del número de aspas que conforman la hélice rotativa se podrá determinar cuándo se ha completado una revolución.

Para reforzar los pulsos provenientes del encoder se utiliza un amplificador operacional “OP.AMP.” (por sus siglas en inglés) LM393 (Fig. 4) con aplicación para fuente de voltaje simple o baterías, este se comporta como un seguidor de voltaje lo que permite que la señal de salida cambie entre 0V o 5V comportándose como una señal digital, la cual llegará al microprocesador para interactuar con el videojuego.

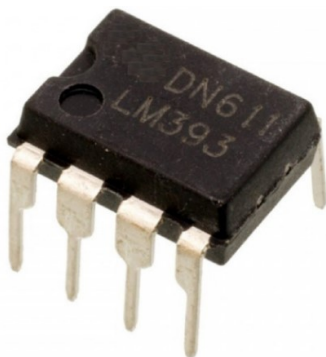


Fig. 4. Microchip LM393.

El microchip procesará la señal proveniente del “OP.AMP.” y la redirigirá al videojuego para que pueda interactuar con este, el microprocesador encargado de realizar este trabajo es el ATmega328P y se encuentra en las placas de Arduino uno y nano (Fig. 5)

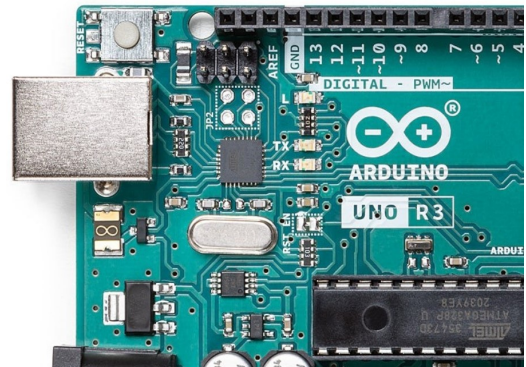


Fig. 5. Arduino uno.

1.4 Perfil aerodinámico

Para que la pala giratoria pueda rotar libremente con la mínima resistencia posible y el menor esfuerzo ejercido por parte del usuario se necesita que las aspas de las hélices tengan el ángulo de ataque (también conocido como ángulo de inclinación) y el perfil aerodinámico correctos ya que estas estarán fijadas al cuerpo principal de la turbina cambiando la dirección del flujo de aire permitiendo a la pala moverse. Por lo que es necesario saber las propiedades del aire que circulará por un área con una temperatura determinada (A.D.A.M., 2021), en este caso en particular se trata del aire que es exhalado de los pulmones de una persona y que pasará por las hélices de la turbina.

Usando (1) calculamos la velocidad con la que se desplaza el fluido obteniendo $v = 19.5 \text{ m/s}$, partiendo del flujo máximo es de 14 L/s por lo que hay que convertirlos a $Q = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ y el área por la que circulará el fluido es de $A = 0.00071805 \text{ m}^2$.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Propiedades del aire a una temperatura de 36°C :

- Densidad: $\rho = 1.145 \text{ kg/m}^3$.
- Viscosidad dinámica: $\mu = 1.895 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.
- Viscosidad Cinemática: $\nu = 1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Para la elección del perfil es necesario conocer el tipo de movimiento que tendrá el fluido mediante el número de Reynolds que actuarán sobre el área por la que pasará el flujo de aire la cual es de $L = 0.0305 \text{ m}$ y los datos anteriormente mencionados usando (2).

$$Re = \frac{L v \rho}{\mu} \quad (2)$$

El número de Reynolds que presenta es de $35,936.0818$ indicando que el tipo de movimiento es turbulento, con lo que se busca un perfil que tenga un valor igual o aproximado a este. El perfil que cumple con los cálculos previos es el NACA 6409 9% (Fig. 6).

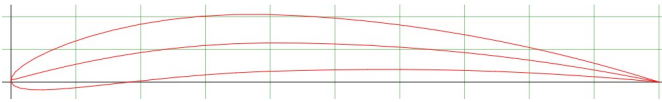


Fig. 6. NACA 6409 9%.

Una vez se tiene el perfil se procede a revisar cual es el ángulo de ataque que le permita ser lo más eficiente posible, para esto es necesario revisar las gráficas (Fig. 7) donde se comparan los coeficientes de sustentación (C_L) y de arrastre (C_D) conforme van aumentando el ángulo de inclinación (α). Como resultado del análisis se determina que el ángulo de 9° permite obtener la mejor relación sustentación-arrastre, por lo que este se implementara en las hélices fijas.

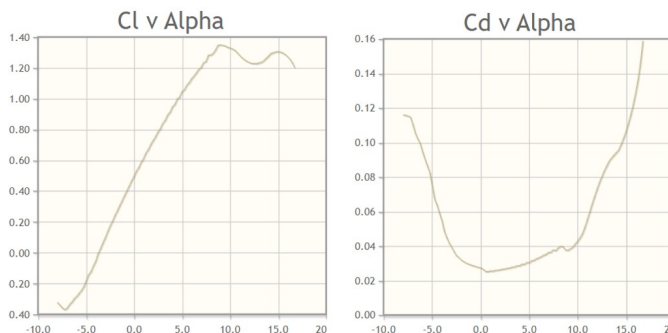


Fig. 7. Coeficientes de sustentación y arrastre en relación con el ángulo Alpha.

2. Plataforma de juegos serios

2.1 Plataforma de Desarrollo

Para este proyecto se utiliza la plataforma Unity, con ella se pueden elaborar juegos en tres dimensiones o de dos dimensiones con la temática que el desarrollador prefiera. Esta herramienta permite conectar dispositivos externos los cuales se pueden programar y enlazarlos con Unity para que funcionen como controles asignándoles la función que se requiera.

2.2 Mecánica del juego

Para el desarrollo se declina por la modalidad de dos dimensiones y se implementa una mecánica sencilla que se ha utilizado regularmente en los juegos desarrollados en esta plataforma, la cual pueda ser entendida por cualquier persona, permitiendo dominar rápidamente el funcionamiento básico del juego en pocas partidas.

Esta mecánica consiste en elevar un objeto y alcanzar la mayor altura posible, acumulando puntos cuando se complete una determinada altura, además de mostrar la altura máxima a la que se a llegado en partidas anteriores por lo que motiva al jugador a romper su propia marca.

2.3 Lenguaje de programación

El lenguaje de programación que utiliza Unity a través de VisualStudio es C# por lo que su redacción es bastante amigable con el programador, el segundo lenguaje es una derivación del lenguaje original el lenguaje C, como también lo es C#, pero en este caso Arduino trabaja con una versión simplificada o diluida de C++.

VisualStudio en Unity se encarga de decirle a los objetos que y como se deben mostrar en la pantalla, incluso a los objetos que no ve el jugador y están reservados para el desarrollador, también se encarga de realizar la conexión con un programa almacenado en un microprocesador como es en el caso de Arduino y el dispositivo utilizado para la rehabilitación pulmonar.

El código utilizado en la placa Arduino sirve como puente o enlace entre lo que censa el artefacto y su consecuencia visualizada en el juego como una acción para lograr un objetivo en este caso llegar más alto.

2.4 Temática

La temática consiste en familiarizar al usuario con un pasatiempo clásico que la mayoría de las personas conoce sin importar su edad, permitiendo tomarle aprecio rápidamente motivándole a jugarlo y ser testigo de que su esfuerzo está teniendo resultados (Fig. 8).

La popularidad de los juegos es debido al potente generador de emociones positivas reforzadoras que se crean en el cerebro humano, siendo estos divertidos, ágiles, cambiantes, atractivos y principalmente retadores, la mayoría son fáciles de usar, pero casi todos son difíciles de dominar. Todas las sensaciones mencionadas anteriormente son creadas por medio de los sistemas cerebrales de recompensa. La motivación juega un papel importante en el cumplimiento de una meta, así como la persistencia para lograrla (Ledo Rubio *et al.*, 2016).



Fig. 8. Presentacion del concepto basico de la interfaz del juego.

2.5 Perspectiva

La interfaz con la que interactúa el usuario final y con la que logra percibir la sensación de movimiento a través del escenario de manera vertical y horizontal no es más que el resultado de una ilusión óptica generada por los elementos que rodean al personaje principal siendo en este caso un papalote o cometa (Fig. 9).

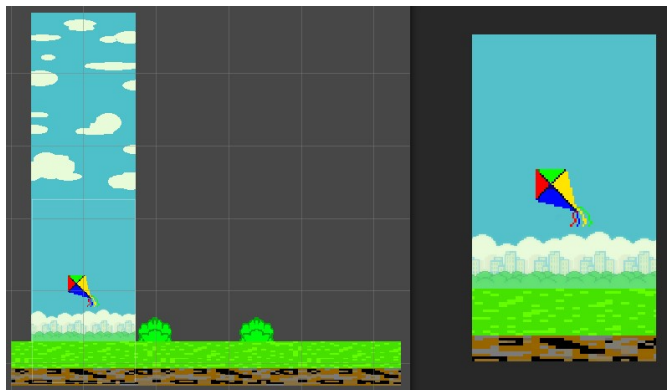


Fig. 9. Perspectiva de la escenografía

Para lograr este efecto se comienza con la superficie de referencia en este caso se trata del suelo, para que el piso se desplace hacia la izquierda de manera automática se realiza una animación, esta consiste en desplazar de manera manual el suelo hasta el borde derecho de la pantalla que el jugador puede ver, esta acción se graba y se añade al objeto para que se ejecute indefinidamente mientras el juego está en marcha.

El desplazamiento vertical consiste en mostrar la continuación del fondo en la parte superior cuando el papalote se acerque al límite superior de la pantalla, si el personaje sigue ascendiendo el fondo con las nubes volverá a aparecer dejando atrás el fondo principal. En el momento que el papalote comienza a descender el proceso se repite, pero en este caso el fondo se encontrara en la parte inferior de la pantalla hasta llegar al fondo original.

El fondo que queda oculto en el lado opuesto de la pantalla se desactiva por lo que no vuelve a aparecer hasta que el desplazamiento del papalote cambie.

Siendo el papalote el objeto principal del juego este debe también ser parte de la perspectiva por lo que debe contribuir con el escenario, para dar el efecto de interacción con el viento se utiliza el mismo método que se aplico con el suelo, pero en este caso se hace una secuencia de las imágenes recreando el movimiento característico de un papalote (Fig. 10).

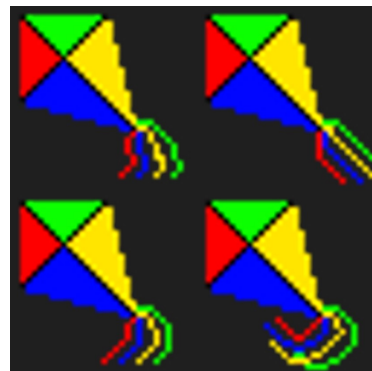


Fig. 10. Animacion del papalote

3. CONCLUSION

En este artículo se describió la selección de un dispositivo que permite medir el flujo de aire exhalado por una persona y canalizar esa información hacia un videojuego logrando que las sesiones de rehabilitación pulmonar sean más amenas para el paciente que las realice.

La temática y la mecánica son sencillas ya que están pensadas para que cualquier persona pueda interactuar y no saturar de información al usuario y que no desista en su intento por completar el juego.

El uso del formato de la turbina permite descartar factores ambientales que, si pueden afectar a los otros formatos, por lo que lo hace el candidato ideal para ser portátil siendo esta su principal ventaja, además de que el videojuego al ser de un tamaño reducido permite aprovechar el espacio de memoria restante para guardar información sobre las partidas jugadas, las cuales pueden ser consultadas cuando sea necesario.

La conexión entre la herramienta de rehabilitación y el dispositivo donde se ejecuta y procesa la información es la mayor limitante, esto restringe la movilidad y/o el desplazamiento con el dispositivo, por lo que se debe tener prudencia cuando sea utilizado, para así evitar que se pierda la conexión entre ambos.

REFERENCIAS

- A.D.A.M., E. médica (2021) *Temperatura corporal normal*. Available at: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/001982.htm> (Accessed: 18 March 2023).
- Gallego Tuñón, J.M. (2016) *Eficacia de los juegos serios desarrollados para los pacientes: revisión de la literatura*.
- García-Río, F. et al. (2013) 'Espirometría', *Archivos de Bronconeumología*, 49(9), pp. 388–401. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2013.04.001>.
- Giner, J., Burgos, F. and SIBELMED (2014) *Curso de espirometría*.

Ledo Rubio, A.I. *et al.* (2016) *Videojuegos y Salud Mental: De la adicción a la rehabilitación*.

Liu, K. *et al.* (2020) 'Respiratory rehabilitation in elderly patients with COVID-19: A randomized controlled study', *Complementary Therapies in Clinical Practice*, 39, p. 101166. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2020.101166>.

Miller, M.R. *et al.* (2005) 'Standardisation of spirometry', *European Respiratory Journal*, pp. 319–338. Available at: <https://doi.org/10.1183/09031936.05.00034805>.

Suárez S, J.L. (2020) 'Rehabilitación Pulmonar en el Paciente Con Covid 19'.

Vázquez García, J.C. and Pérez Padilla, R. (2018) *Manual de Espirometría*. Available at: www.medigraphic.org.mx.

Esquema de observadores generalizados para el diagnóstico de fallas en sensores de una columna de destilación de tres platos

Elías Ramos Hernández* Carlos Manuel Astorga Zaragoza*
Juan Reyes Reyes* Dulce Beatriz Garcilazo Mendoza*
Marlem Flores Montiel**

* Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Interior Internado
Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 6249, Cuernavaca, Morelos México.
m22ce023@cenidet.tecnm.mx

** TecNM/Instituto Tecnológico de Cuautla

Resumen: Los autores presentan un esquema de observadores lineales de tipo Luenberger, con la finalidad de detectar fallas en un proceso de destilación. La metodología consiste en la generación y evaluación de residuos a partir de tres observadores de orden completo, con los cuales es posible localizar fallas en los sensores. El resultado propuesto se implementa en una simulación numérica de una columna de destilación de tres platos, en la que el sensor de concentración del componente más volátil del plato uno está sujeto a falla.

Palabras clave: Esquema de observadores generalizados, destilación, generación y evaluación de residuos.

1. INTRODUCCIÓN

Los esquemas de observadores son estrategias basadas en el modelo matemático del proceso y son usados ampliamente para la localización de fallas en sensores y actuadores. La estructura del esquema depende de la parte del sistema en donde se desea localizar la falla.

El esquema de observadores generalizados (**GOS**) por sus siglas en inglés (**Generalized Observer Scheme**) tiene una estructura particular, en donde para localizar n fallas en sensores es necesario el diseño de n observadores, en donde cada observador recibe todas las entradas del sistema y sólo dos salidas Okada et al. (2021).

El sistema de destilación considerado en este artículo tiene tres sensores de concentración de líquido del componente más volátil, por lo tanto se diseñan tres observadores en donde cada observador recibe todas las entradas del sistema y dos salidas.

2. MODELOS MATEMÁTICOS DEL PROCESO DE DESTILACIÓN

Los modelos matemáticos del proceso de destilación son propuestos por Skogestad et al. (1997), en donde el sistema indicado en (1) representa el modelo matemático no lineal de una columna de destilación y la estructura del modelo lineal se expresa en (5).

$$\Sigma_{NL} \begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = (L + F)x_2 - \frac{V\alpha x_1}{1 + (\alpha - 1)x_1} - (L + F - V)x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = FZ_F + \frac{V\alpha x_1}{1 + (\alpha - 1)x_1} + Lx_3 - \frac{V\alpha x_2}{1 + (\alpha - 1)x_2} - Lx_2 \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{V\alpha x_2}{1 + (\alpha - 1)x_2} - Lx_3 - (V - L)x_1 \end{cases} \quad (1)$$

Para facilitar la notación del sistema no lineal y plantear la estructura del modelo lineal se hace uso de la ecuación (2).

$$\dot{x} = f(x, L, V, F, Z_F) \quad (2)$$

2.1 Sistema lineal

Se calcula el jacobiano de las funciones obteniendo las matrices A , B y E

donde:

$$A = \frac{\partial f}{\partial x}, \quad B = \frac{\partial f}{\partial u}, \quad E = \frac{\partial f}{\partial d} \quad (3)$$

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T, \quad u = [L \ V]^T, \quad d = [F \ Z_F]^T \quad (4)$$

La estructura del sistema lineal es la siguiente:

$$\Sigma_L \begin{cases} \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u + E\Delta d \\ \Delta y = C\Delta x \end{cases} \quad (5)$$

Las variables de desviación del sistema se definen por las ecuaciones que se muestran en (6).

$$\Delta x = (x - x^{eq}), \quad \Delta u = (u - u^{eq}), \quad \Delta d = (d - d^{eq}) \quad (6)$$

2.2 Condiciones iniciales y valores numéricos

Tabla 1. Valores numéricos de las constantes del sistema

Símbolo	L	V	F	Z_F	α
Valor	3.05	3.55	1.00	0.50	10

Condiciones iniciales de las variables de estado.

$$x_{ini} = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (7)$$

El punto de equilibrio y las entradas correspondientes son:

$$x^{eq} = [0.10 \ 0.40 \ 0.90]^T, \quad u^{eq} = [3.05 \ 3.55]^T, \quad d^{eq} = [1.00 \ 0.50]^T \quad (8)$$

3. ESTRUCTURA DEL ESQUEMA DE OBSERVADORES

Como se puede notar en la Fig. 1 la ecuación que describe a las salidas medidas es $y_{mi} = y_i + w_i + f_i$, donde y_i son las concentraciones líquidas de cada plato, w_i es el de ruido de medición para cada sensor y f_i son las fallas para cada sensor donde $i = 1, 2, 3$. Por tanto las matrices C_i para el diseño de los observadores tienen las siguientes estructuras.

$$C_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad C_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Las matrices de observabilidad del sistema se expresan en (10), en donde con el comando **rank** de MATLAB se verifica el rango de dichas matrices, véase ecuación (11).

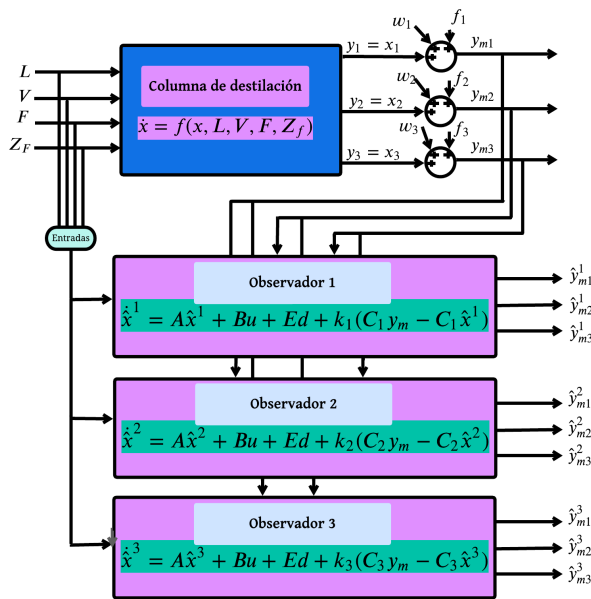


Fig. 1. Esquema de diagnóstico de fallas GOS

$$M_{obs_i} = \begin{pmatrix} C_i \\ C_i A \\ C_i A^2 \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

$$\text{rank}(M_{obs_i}) = 3. \quad (11)$$

Lo cual garantiza que se puedan estimar los estados por cada observador. Para el cálculo de los vectores de ganancias k_i para los observadores, se determinan previamente los polos en -2, -3 y -16, de modo que auxiliándose del comando **place** se calculan en MATLAB, como se muestra en la sintaxis de la ecuación (12).

$$k_i = \text{place}(A, C_i', [-3 \ -2 \ -16]), \quad i = 1, 2, 3. \quad (12)$$

4. ESCENARIO DE FALLA

En la salida $y_1 = x_1$ del esquema de la Fig. 1 se le añade una variable w_1 que simboliza el ruido de medición del sensor uno, además se le añade una falla permanente de tipo abrupta f_1 con magnitud del 15% del valor que mide el sensor, esta falla ocurre en el segundo 25 del tiempo de simulación.

5. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESIDUOS

Una forma de generar residuos es mediante redundancia analítica, donde se hace una diferencia entre las salidas medidas y las salidas estimadas por los observadores Bernardi and Adam (2020).

$$r_i^j = y_{mi} - \hat{y}_{mi}^j, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (13)$$

donde:

j representa el número de observador.

i el número de la salida.

De tal forma que r_i^j representa el residuo correspondiente a la salida i del observador j .

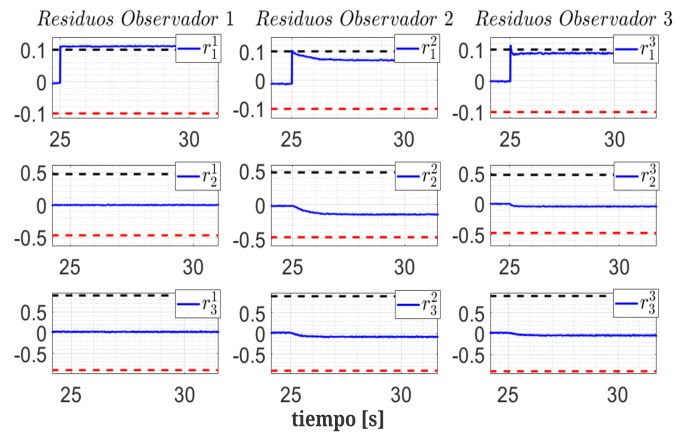


Fig. 2. Residuos generados por los observadores

6. CONCLUSIÓN

La simulación realizada se muestra en la Fig. 2, en donde cada columna del arreglo de gráficas muestra los residuos generados por cada observador. Nótese que en la columna dos y tres de la Fig. 2, los residuos generados por el observador dos y el observador tres son diferentes de cero, pero no se consideran falla ya que no sobrepasan el umbral definido, mientras que en la columna uno de la Fig. 2 el observador uno tiene un residuo que sobrepasa el umbral y se mantiene en ese valor, este análisis permite localizar el sensor que está fallando, que en este caso se deduce que es el sensor uno. Los umbrales se definen tomando como referencia los valores de x_i ya que representan las concentraciones líquidas en cada plato de la columna.

REFERENCIAS

- Bernardi, E. and Adam, E. (2020). *Diseño de observadores para la detección y diagnóstico de fallas aplicados a la industria de procesos*. Master's thesis, Universidad Tecnológica Nacional.
- Okada, K.F.Á., de Moraes, A.S., Oliveira-Lopes, L.C., and Ribeiro, L. (2021). A survey on fault detection and diagnosis methods. In *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 1422–1429. IEEE.
- Skogestad, S. et al. (1997). Dynamics and control of distillation columns: A tutorial introduction. *Chemical Engineering Research and Design*, 75(6), 539–562.

Aplicación de una red neuronal inversa para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)

I. T. Rojas-Arredondo^a, J. García-Morales^a
M. Cervantes-Bobadilla^b, A. Claudio-Sánchez^a.

^a Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Int. Internado Palmira S/N, Palmira 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico.

^b Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp-IICBA)/UAEM, Av. Universidad 1001, Chamilpa, 62209 Cuernavaca, Morelos, México.

Resumen: Se describe el diseño y la simulación de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) basado en redes neuronales artificiales para mejorar la eficiencia de la energía generada por paneles solares. El algoritmo propuesto, llamado ICANNi, utiliza una red neuronal artificial inversa (ANNi) combinada con una ley de control integral (IC) para mejorar la precisión del seguimiento y eliminar las oscilaciones en estado estacionario. En comparación con el algoritmo de seguimiento P&O (perturbar y observar) más comúnmente utilizado, el ICANNi mostró un mejor desempeño del MPPT.

Palabras clave: MPPT, redes neuronales, paneles fotovoltaicos, conversión de energía.

1. INTRODUCTION

Las técnicas de MPPT tienen como función principal maximizar la energía generada por los sistemas fotovoltaicos, se realiza utilizando un convertidor CD-CD controlado mediante una señal PWM (Becerra-Pérez, González-Díaz, & Villegas-Gutiérrez, 2021). La Figura 1 nos muestra un esquema general del MPPT:

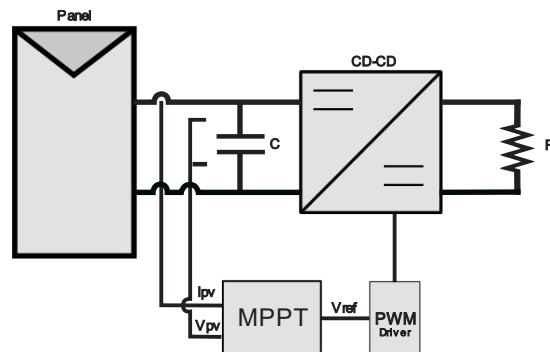


Figura 1. Esquema general del seguimiento del punto máximo de potencia.

Los algoritmos para el seguimiento de máxima potencia se clasifican en tres vertientes: en línea, fuera de línea y algoritmos híbridos. Los algoritmos en línea más utilizados son P&O e IncCond, aunque IncCond reporta una mayor eficiencia y una reducción en las oscilaciones. Los algoritmos fuera de línea, como algoritmos de optimización, las redes neuronales y la lógica difusa, reducen significativamente las oscilaciones y reportan eficiencias aún mayores, siendo los algoritmos de optimización los más eficientes. Los algoritmos híbridos combinan las técnicas de las dos vertientes antes mencionadas, y presentan un mejor desempeño en términos de eficiencia y capacidad de adaptación a condiciones meteorológicas cambiantes. En la figura 2 se presenta el desempeño promedio

de cada algoritmo (Motahhir, El Hammoui, & El Ghzizal, 2020; Sarvi & Azadian, 2022).

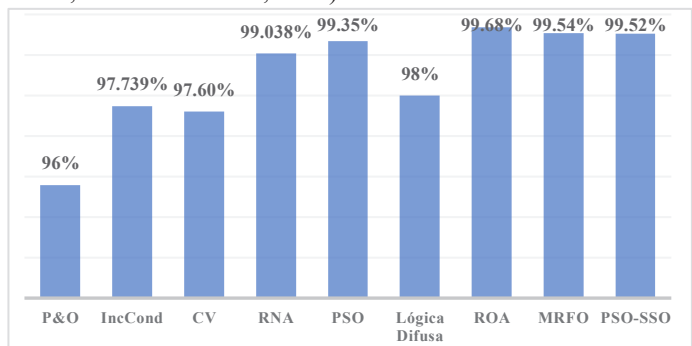


Figura 2. Desempeño de los diferentes algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia.

El objetivo de este artículo es realizar una comparación de la dinámica que presenta uno de los algoritmos más utilizados de MPPT: perturbar y observar P&O, con el algoritmo propuesto, que está basado en una red neuronal artificial inversa. Esto con el propósito de valorar el desempeño del sistema en términos dinámicos y energéticos.

2. METODOLOGÍA

Se propone una red neuronal artificial (ANN) que sea característica del sistema donde alguna de sus entradas sea la variable que se necesita controlar, y su salida sea una variable que se pueda medir. En este caso se propone una red feed-forward de una neurona en su capa oculta, una salida que es la irradiancia (G) y tres neuronas de entrada: el voltaje del panel (V_{pv}), la corriente del panel (I_{pv}) y el ciclo de trabajo (D). La función de activación en la capa oculta es una función tangente hiperbólica y en su neurona de salida es una función lineal. El polinomio característico de la red se presenta en la siguiente expresión (Cervantes-Bobadilla et al., 2020).

$$y_{ann} = LINEAR[w_o(\tanh(W_i x_j + b_{i(s)})) + b_o] \quad (1)$$

Donde

y_{ann} = Irradiancia G

x_j = Datos de entrada ($x_1 = D, x_2 = I_{pv}, x_3 = V_{pv}$)

W_i = Pesos

$b_{i(s)}$ = Sesgos (bias)

Los pesos se obtienen mediante el algoritmo de retro-propagación de errores los cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de los pesos (w) y bias (b) de la red neuronal artificial característica del sistema fotovoltaico.

Pesos y bias calculados para la ANN					
$W_{i1,1}$	-0.0153	$W_{i1,2}$	-0.182	$W_{i1,3}$	-0.0041
$W_{o1,2}$	-2.8818×10^3				
b_{i1}	0.4479				
$b_{o1,1}$	1.7582×10^3				

Mediante la ecuación 1 es posible determinar la salida del sistema siempre y cuando se conozcan los parámetros de entrada. Para esta aplicación, la variable que se desea determinar por la red neuronal artificial inversa (ANNi) es el ciclo de trabajo (D). A continuación, se presenta la expresión despejada para el ciclo de trabajo, que a su vez es la red neuronal artificial inversa ANNi.

$$D = \left[\frac{-\frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{W_{o1,1} - G + b_{o1,1}}{W_{o1,1} + G - b_{o1,1}} \right) \right] - W_{i1,2} I_{pv} - W_{i1,3} V_{pv} - b_{i1}}{W_{i1,1}} \right] \quad (2)$$

3. RESULTADOS

El sistema se somete a valores de irradiancia solar real extraídos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Sinaica). Los valores corresponden a la irradiancia incidente en el municipio de Cuernavaca en el estado de Morelos, en el mes de diciembre del año 2019, se tomaron los primeros días del mes (1-3) en un horario de 9:00 am a 14:00 pm, donde la irradiancia es mayor a 600 W/m². En la Figura 3 se muestra de manera gráfica el comportamiento de la irradiancia.

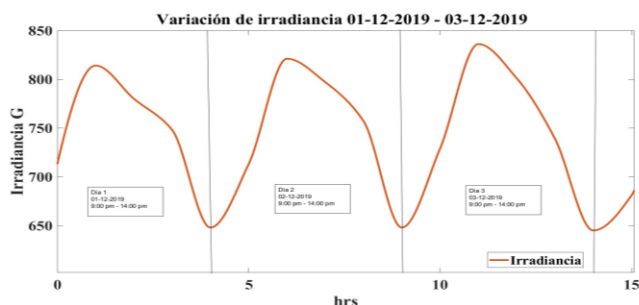


Figura 3. Irradiancia incidente en Cuernavaca en las fechas 01-12-2019 – 01-12-2019.

3.1. Algoritmo Perturbar & Observar (P&O)

El sistema logra seguir al punto de máxima potencia, sin embargo, presenta oscilaciones alrededor del punto. En la Figura

4 se observa la dinámica del algoritmo P&O con respecto a los puntos de máxima potencia.

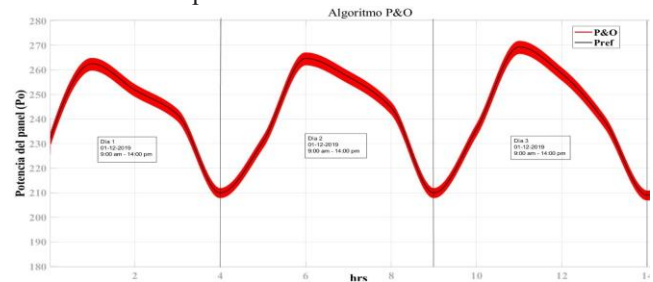


Figura 4. Seguimiento del punto de máxima potencia con el algoritmo P&O con irradiancia real.

3.2. Algoritmo basado en la red neuronal artificial inversa ICANNi

En la Figura 5 se presenta la dinámica que se obtiene al aplicar el algoritmo ICANNi.

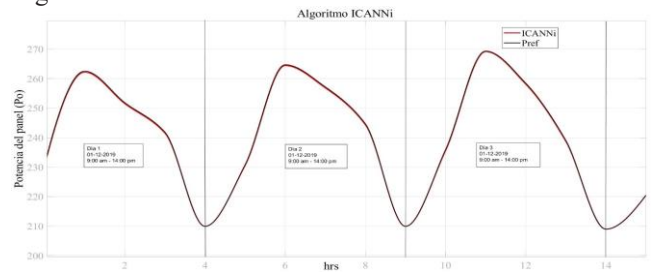


Figura 5. Seguimiento del punto de máxima potencia con el algoritmo ICANNi e irradiancia real.

4. CONCLUSIONES

El algoritmo ICANNi supera al algoritmo P&O en cuanto a su rendimiento al eliminar completamente las oscilaciones en estado estacionario, disminuir el estrés en el dispositivo de conmutación y reducir el error de seguimiento del algoritmo P&O. Todo esto conduce a una mejora significativa en la eficiencia de conversión energética, como se evidencia en los resultados: mientras que el algoritmo P&O logra una eficiencia total del 93%, el algoritmo ICANNi alcanza un 98% (Para el cálculo de la eficiencia se toman en cuenta; la eficiencia del algoritmo y la eficiencia del convertidor).

REFERENCIAS

- Becerra-Pérez, Luis A, González-Díaz, Romel R, & Villegas-Gutiérrez, Ana C %J RINDERESU. (2021). La energía solar fotovoltaica, análisis costo beneficio de los proyectos en México. 5(2).
- Cervantes-Bobadilla, M., García-Morales, J., Escobar-Jiménez, R. F., Hernández-Pérez, J. A., Gómez-Aguilar, J. F., & Olivares-Peregrino, V. H. (2020). Experimental implementation of a new control approach using an inverse neural network to on-demand hydrogen production. *Control Engineering Practice*, 105, 104631. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104631>
- Motahhir, Saad, El Hammoui, Aboubakr, & El Ghzizal, Abdelaziz %J Journal of cleaner production. (2020). The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. 246, 118983.
- Sarvi, Mohammad, & Azadian, Ahmad %J Energy Systems. (2022). A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems. 13(2), 281-320.

Estudio de una máquina síncrona en sistemas de almacenamiento por gravedad

Ing. Manaen Ochoa Martínez* Dr. Mario Ponce Silva**
Dr. Victor Hugo Olivares Peregrino***, MC. Sergio Suriano I. Suriano-Sánchez****

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos(m21ce084@cenidet.tecnm.mx*, mario.ps@cenidet.tecnm.mx**, victor.op@cenidet.tecnm.mx***, m20ce079@cenidet.tecnm.mx****)

Resumen: Se presentan las características de un sistema de almacenamiento de energía por gravedad con el fin de obtener los datos necesarios para realizar el diseño de una máquina síncrona (generador/motor) de imanes permanentes que se aplicará en este tipo de sistemas, simulaciones preliminares muestran concordancias entre los resultados calculados y obtenidos por simulación.

Keywords: Almacenamiento de energía, Almacenamiento por Gravedad, Máquina eléctrica síncrona.

1. INTRODUCCIÓN

Durante estos últimos años las energías renovables han tenido un auge gracias a los desafíos que ha presentado el cambio climático a nivel mundial. El almacenamiento de energía es un factor importante para la implementación de estas energías a gran escala debido a que este tipo de energías dependen de factores ambientales en su mayoría.

Existen diferentes técnicas de almacenamiento de energía, destacando los siguientes:

- Sistemas de almacenamiento de energía a base de baterías.
- Sistemas de almacenamiento de energía por aire comprimido
- Sistemas de almacenamiento de energía por gravedad.

Una de las alternativas de almacenamiento serían los sistemas de almacenamiento de energía por gravedad, la **Error! Reference source not found.** muestra dicho sistema en su proceso de almacenamiento de energía, siendo un sistema relativamente nuevo y novedoso, realizar el análisis de este sería de gran utilidad para poder establecer parámetros de diseños en sus distintas partes, destacando, en este caso, la máquina eléctrica que permite elevar la masa de concreto [1,2,3].

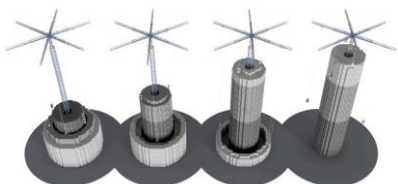


Fig 1 Sistema de almacenamiento de energía por gravedad [2].

2. ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA POR GRAVEDAD

Un sistema de almacenamiento de energía por gravedad presenta la estructura presentada en la Fig 2, donde se toma en todos los pasos de almacenamiento de energía desde la fuente de energía renovable hasta el punto de descarga de la energía almacenada.

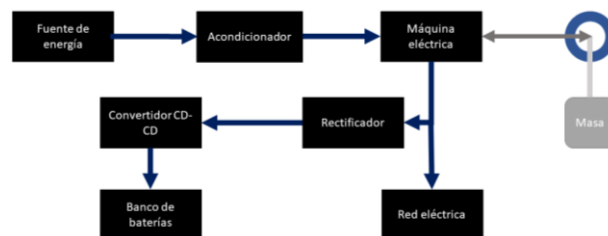


Fig 2 Estructura de un sistema de almacenamiento de energía por gravedad.

Se toman los parámetros considerados para análisis de la parte mecánica del sistema de almacenamiento de energía mostrados en la literatura [2] para poder realizar un análisis a escala del sistema de almacenamiento de energía, por lo que para poder iniciar con el análisis del presente sistema de almacenamiento de energía es necesario proponer ciertos valores, presentados en la Tabla 1:

Tabla 1 Valores propuestos

Altura	Potencia	Velocidad	Densidad del material del bloque
15 m	1 hp	3 m/s	2400 kg/m ³

Realizando los cálculos previos del sistema, se obtienen los valores como masa, el trabajo necesario a efectuar al momento de elevar el bloque de concreto, el tiempo que se requiere para almacenar la energía requerida, y las dimensiones del bloque de concreto, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos obtenidos.

Tiempo de almacenaje	Fuerza efectuada	Masa del bloque	Volumen del bloque	Dimensiones
1.8 seg.	895.19 N	7.342 kg	3033.6 cm ³	8x8x47.4cm

Se considera de igual forma la altura útil del sistema tomando en cuenta las dimensiones de los bloques, teniendo esto se obtiene la cantidad de energía almacenada, como se muestra en Tabla 3.

Tabla 3. Datos de almacenamiento

Altura útil	Energía de descarga	Energía de carga
14.7989 m	2.9797 wh	3.724 wh

3. DATOS PARA EL DISEÑO DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA DE IMANES PERMANENTES

Tomando en consideración los datos calculados en el análisis del sistema se toma como punto de partida para calcular los parámetros de diseño de la máquina eléctrica síncrona de imanes permanentes como motor [3,4], dichos valores se encuentran en la Tabla 4:

Tabla 4- Datos calculados para una máquina síncrona de imanes permanentes

Símbolo	Variable	Resultado
P	Potencia	745.7 w
V	Fuerza contra electromotriz	24 v
f_e	Frecuencia eléctrica fundamental	60Hz
N_s	Número de Ranuras	24
T	Torque a partir de la potencia	1.3263 Nm
R_b	Radio interior del estator	40.6 mm
R_{os}	Radio Exterior del estator	50.2 mm
W_m	Longitud del imán	46.2 mm
H_{pm}	Altura del imán	1 mm
d_{yr}	Ancho del núcleo del rotor	11.4 mm
R_{or}	Radio externo del rotor	69 mm
R_r	Radio interno del rotor	57.6 mm
W_{is}	Ancho del diente	15.1 mm
d_{ys}	Ancho del núcleo del estator	21.2 mm
A_s	Área de la ranura	9.8847 um ²
N_s	Número de vueltas por ranura	12

I_{ph}	Corriente de fase	6.944 A
R_{ph}	Resistencia de fase	0.3834 ohm
P_r	Pérdidas óhmicas	27.73 W
P_{el}	Pérdidas en el hierro	0.1199 W
N_p	Eficiencia sin pérdidas mecánicas	90%

Se realizó el diseño del motor, efectuando su respectiva simulación, tomando en cuenta los parámetros previamente calculados, se logra ver que los datos de cálculo son parecidos, cumpliendo los requerimientos de diseño

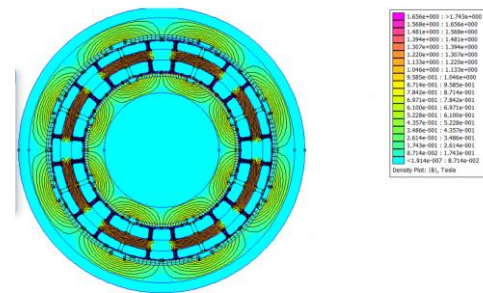


Fig 3. Máquina eléctrica síncrona simulada.

4. CONCLUSIONES

Se ha encontrado que los sistemas de almacenamiento por gravedad son factibles para realizar diferentes casos de estudios, el presente trabajo muestra un análisis en la cantidad de energía que es posible almacenar, teniendo relación con la máquina eléctrica utilizada al momento del almacenaje. Se obtienen los parámetros para el diseño de una máquina eléctrica síncrona, en este caso de imanes permanentes.

5. REFERENCIAS

- [1] C. Yangyang, H. Hou, T. Xu, X. Wu, P. Liu, and H. Wang, "A New Gravity Energy Storage Operation Mode to Accommodate Renewable Energy," in Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, 2019, vol. 2019-December.
- [2] S. K. Moore, "The Ups and Downs of Gravity Energy Storage: Startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage," IEEE Spectrum, vol. 58, no. 1. 2021.
- [3] SURIANO-SÁNCHEZ, Sergio I., et al. A Review of Torque Ripple Reduction Design Methods for Radial Flux PM Motors. Eng, 2022, vol. 3, no 4, p. 646-661.
- [4] R. Qu and T. A. Lipo, "Dual-rotor, radial-flux, toroidally wound, permanent-magnet machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 6, 2003.

Desempeño en predicción de imágenes de nubosidad con redes neuronales.

Alejandro Peña Vargas *
Gerardo Vicente Guerrero Ramírez *
Carlos Daniel García Beltrán * Monica Borunda *

* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Cuernavaca, CP 62490 México (e-mail: m21ce086@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: En este estudio, se llevó a cabo una comparación detallada del rendimiento de predicción de dos tipos de redes neuronales: una red convolutiva y una red feedforward, esto debido a que son las redes reportadas con mayor frecuencia en la bibliografía utilizadas para este propósito. El objetivo principal es analizar, observar y comparar la eficacia de ambas redes en términos de predicción. Para ello se realizaron diversas pruebas numéricas con varios conjuntos de datos. Los resultados obtenidos se analizaron en detalle y se compararon entre sí para evaluar la eficacia y las limitaciones de cada tipo de red neuronal, obteniendo resultados de predicción donde se aprecia mayor eficiencia en la red neuronal convolutiva a varios pasos y se obtuvo un resultado mejor para la red feedforward a un paso. Como paso siguiente se propuso una red de ajuste para hacer la predicción de irradiación teniendo como entradas las imágenes de predicción de las anteriores redes, observando que por sí sola la red de ajuste no es lo suficientemente robusta para absorber los errores de predicción. Con el objetivo de minimizar los errores de predicción se hizo una discretización de las imágenes de entrada de estas redes, de esta manera se obtuvieron mejores resultados en las redes estudiadas en este trabajo.

Keywords: Red neuronal convolutiva(CNN), feedforward, error cuadrático medio.

1. INTRODUCCIÓN

Es de gran importancia contar con cierto nivel de certeza en el comportamiento de la nubosidad para su uso en diversos ámbitos, entre ellos, la predicción de la irradiación solar, modelos climatológicos, predicción de generación en sistemas fotovoltaicos, etc. En este contexto, la eficiencia en la predicción de la irradiación solar es un factor clave Choi et al. (2021), lo cual motivó la evaluación de la eficacia y desempeño de dos tipos de redes de predicción de nubosidad, el cual puede ser llevado a cabo mediante imágenes utilizando diferentes métodos como el estadístico o mediante métodos de inteligencia artificial.

Para comparar como dan solución otros autores al problema de predicción de irradiación solar se consultaron algunos trabajos que abordan diferentes métodos Penteliuc and Frincu (2019)Salcedo-Sanz et al. (2014).

De igual manera para observar como algunos autores solucionaban el problema de la predicción de imágenes se observaron las soluciones de algunos autores Tang et al. (2022)Uss et al. (2020)Wu et al. (2018).

En el presente documento se muestra el proceso de desarrollo de dos tipos de redes neuronales, la convolucional y

la feedforward, con el propósito de realizar predicciones de imágenes de nubosidad, permitiendo así seleccionar la mejor opción para alimentar un modelo de predicción de irradiación a partir de dichas imágenes Khatib and Elmenreich (2016).

En el presente trabajo científico se seleccionó como área de estudio la región de Cuernavaca, en el estado de Morelos, México, utilizando las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)¹ para llevar a cabo el entrenamiento de dos redes neuronales: la convolucional y la feedforward.

Para generar las bases de datos de entrenamiento, se emplearon series de imágenes de nubosidad capturadas en la zona de estudio. En la figura siguiente Fig(1) se presenta un ejemplo de las imágenes utilizadas en la construcción de dichas bases de datos.

Es fundamental destacar que la elección de esta región como área de estudio se basó en la relevancia del monitoreo de la irradiación solar en la predicción de la producción de energía solar en la zona. Cabe señalar que se dispone de un sistema de medición de la irradiación

¹ Las coordenadas utilizadas para ubicar esta zona son Latitud: 18.88 Longitud:-99.15

solar en esta área, lo que permitió obtener datos precisos y confiables para la realización de la investigación. La información obtenida a partir de este sistema de monitoreo se consideró esencial para validar los resultados obtenidos en la predicción de la irradiación solar a partir de las imágenes de nubosidad procesadas por las redes neuronales convolucional y feedforward.

Como paso siguiente se propuso una red de ajuste para hacer la predicción de irradiación teniendo como entradas las imágenes de predicción de las anteriores redes, observando que por si sola la red de ajuste que esta constituida por una base de datos de nubosidad y datos de irradiación solar proporcionados por modelos teóricos.

Con el objetivo de disminuir la complejidad interna de las diferentes redes y de este mismo modo tratar de minimizar el error de predicción se hizo una discretización de las imágenes utilizadas en estas redes.

2. TRATAMIENTO DE IMÁGENES

Una red convolutiva (también conocida como CNN² por sus siglas en inglés) es una arquitectura de red neuronal profunda que está diseñada específicamente para procesar datos con una estructura de cuadrícula, como imágenes. La red convolutiva consta de varias capas, cada una de las cuales se compone de neuronas que realizan operaciones matemáticas en los datos de entrada.

En el presente estudio se ha desarrollado una red neuronal que utiliza una base de datos de entrenamiento compuesta por 504 imágenes correspondientes a un periodo de 21 días de observaciones de nubosidad. Estas imágenes son representaciones de 7 píxeles por lado, capturando la información de nubosidad en una zona con una extensión de 10 kilómetros por píxel, tal como se ilustra en la figura adjunta Fig(1).



Fig. 1. Muestra de imagen base satelital.

Con el fin de facilitar el entrenamiento de la red convolutiva y reducir el posible error en las predicciones, se realizó un tratamiento de discretización de datos en las imágenes. Cada píxel de las imágenes originales presentaba un valor en el rango [0-255], lo que dificultaba el entrenamiento de la red. Por lo tanto, se implementó un proceso de discretización con 4 niveles que representan diferentes niveles de nubosidad. En concreto, se dividió el rango de

valores [0-255] en los siguientes intervalos: [0-60], [60-120], [120-180] y [180-255]. A cada nivel se le asignó un valor discreto que corresponde al valor medio del intervalo, es decir, el valor 0 se asignó a los píxeles con un valor en el intervalo [0-60], el valor 1 se asignó a los píxeles con un valor en el intervalo [60-120], el valor 2 se asignó a los píxeles con un valor en el intervalo [120-180] y el valor 3 se asignó a los píxeles con un valor en el intervalo [180-255]. De esta manera, se obtuvieron imágenes discretas que representan de manera más clara el nivel de nubosidad y facilitan el entrenamiento de la red Fig(2 ,3).

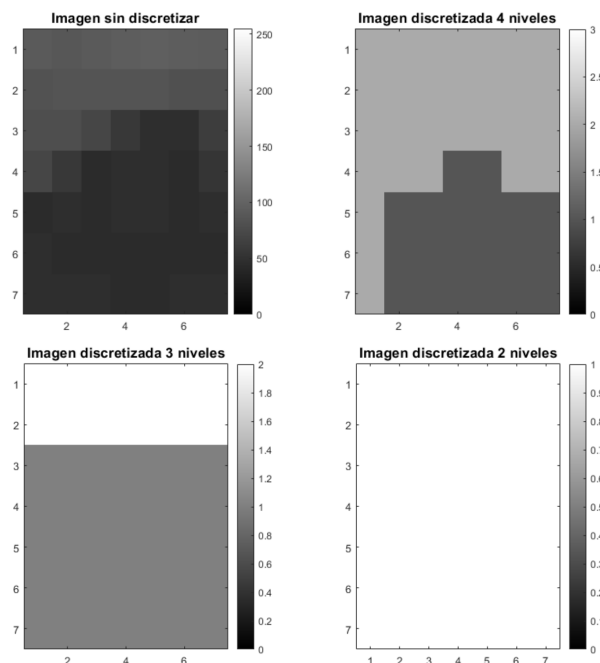


Fig. 2. Ejemplos de discretización.

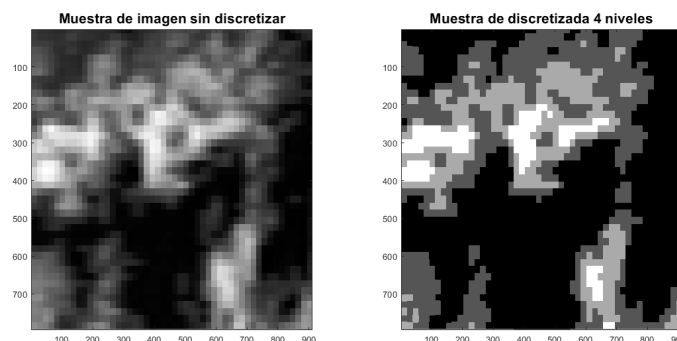


Fig. 3. Muestra de discretización.

Teniendo en cuenta las bases de datos previamente descritas, se generó una sección de datos de entrada que consiste en tensores de matrices que representan 10 imágenes de nubosidad, con una diferencia de una hora entre cada una de ellas. Estos tensores se utilizaron como entradas a la red neuronal convolutiva. Asimismo, se generó una

² Convolutional Neural Networks

sección de datos de salida que consta de imágenes que representan la siguiente imagen del tensor de matrices de entrada.

3. RED NEURONAL DE PREDICCIÓN CONVOLUTIVA

Una vez preparados los datos de entrenamiento, se procedió a diseñar las diferentes capas de la red convolutiva Borunda et al. (2022), tomando en cuenta la salida deseada. Con el objetivo de minimizar el error de predicción, se evaluaron diversas combinaciones de capas, utilizando como criterio de selección el desempeño de la red en la fase de entrenamiento. Como resultado del análisis realizado, se diseñó una red convolutiva de 6 capas convolutivas, en cada una de las cuales se implementó una función de activación tipo ReLU. La salida de la red es una imagen de 7x7 píxeles, que representa la predicción para el siguiente instante de tiempo, con un mínimo de error en la estimación Fig(4) Li et al. (2021) Su et al. (2017).

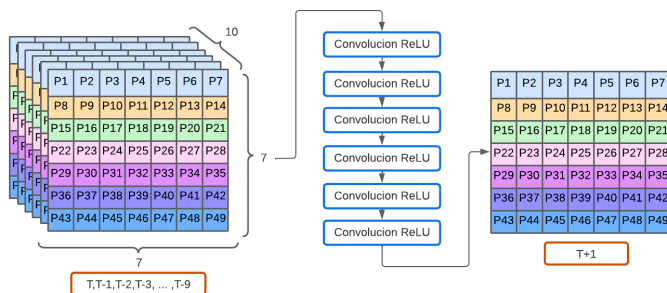


Fig. 4. Estructura de red convolutiva.

Para evaluar el rendimiento de la red de predicción, utilizamos una medida de error cuadrático medio en cada imagen obtenida mediante la red convolutiva. La evaluación del error consistió en calcular la diferencia entre cada uno de los píxeles de la imagen predicha y la imagen real, elevar esta diferencia al cuadrado, sumar los resultados de cada pixel y dividir entre el número total de píxeles evaluados. Posteriormente, se obtuvo la raíz cuadrada de esta operación, lo que resultó en el error cuadrático medio de cada imagen. Este método fue utilizado para evaluar el desempeño de la red de predicción.

La capa más básica de la red convolutiva es la capa convolutiva. En esta capa, se aplica una operación de convolución a la entrada utilizando varios filtros (también conocidos como núcleos de convolución). Cada filtro detecta patrones específicos en la entrada, como bordes, texturas o formas. La operación de convolución consiste en deslizar el filtro sobre la entrada y realizar una multiplicación elemento a elemento entre el filtro y los valores de la entrada en cada posición, y luego sumar los resultados para producir una sola salida. La salida de cada filtro se convierte en una "característica" que representa una parte de la entrada.

Después de la capa convolutiva, se aplica una capa de activación no lineal, como la función ReLU (unidad lineal rectificadora), para introducir no linealidades en la red y mejorar su capacidad para capturar patrones complejos en los datos.

3.1 Resultados de error obtenidos en CNN

Una vez concluido el proceso de entrenamiento de la red convolutiva, se procedió a realizar una evaluación rigurosa de su rendimiento. Para ello, se utilizó un conjunto de imágenes que no habían sido incluidas en el proceso de entrenamiento y se evaluó el error obtenido a través de la aplicación de la red sobre estas imágenes.

Los resultados obtenidos a partir de la evaluación se muestran en Fig(5). En dicha figura, es posible observar que la estimación de la imagen de nubosidad alcanza una gran similitud con la imagen real, lo cual sugiere que la red convolutiva es capaz de generalizar adecuadamente para imágenes fuera del conjunto de entrenamiento.

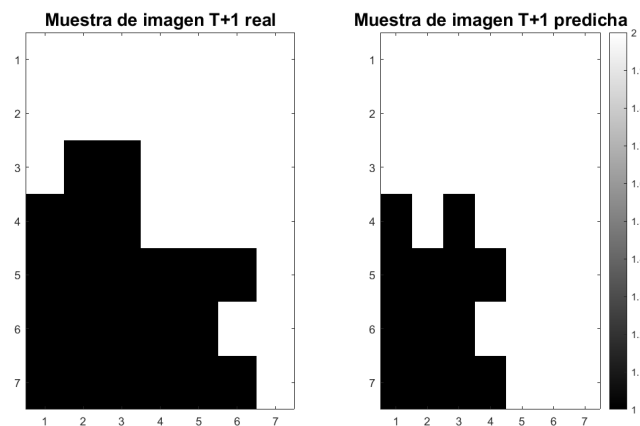


Fig. 5. Muestra de predicción CNN.

Una vez obtenidos estos resultados, se procedió a someter a la red a una serie de predicciones con el objetivo de predecir tiempos posteriores. Para lograr dichas predicciones, se retro alimentó la entrada de la red con la predicción previa de la imagen, lo cual permitió hacer predicciones para mayores instantes de tiempo.

Los resultados obtenidos a partir de la evaluación del error a lo largo del tiempo de estas predicciones se muestran en Fig(8) donde el eje Y representa el error cuadrático medio y el eje X representa el paso de predicción. La evaluación del error a lo largo del tiempo es un criterio importante para evaluar la calidad de las predicciones realizadas por la red. Los resultados obtenidos muestran que la red convolutiva es capaz de generar predicciones precisas y confiables a lo largo del tiempo.

Estos resultados son altamente significativos, ya que demuestran la capacidad de la red convolutiva para aprender y generalizar a partir de un conjunto limitado de datos de entrenamiento. La capacidad de la red para predecir

con precisión tiempos posteriores es un indicador de su capacidad para modelar con precisión los fenómenos subyacentes. Este trabajo contribuye significativamente a la literatura existente sobre la utilización de redes convolutivas para la predicción de fenómenos meteorológicos y abre nuevas posibilidades en la utilización de técnicas de aprendizaje profundo para el estudio de los sistemas naturales.

Con base en los desarrollos realizados de discretización de píxeles, se generaron otros niveles de discretización para evaluar el desempeño de la red neuronal convolutiva en la predicción de imágenes de nubosidad. El objetivo de este análisis fue observar cómo la variación en los niveles de discretización afecta el rendimiento de la red neuronal en la tarea de predicción Fig(6).

Tipo de discretización	RMSE a un paso	RMSE a dos pasos	RMSE a tres pasos	RMSE a cuatro pasos
4 niveles (0,1,2,3)	0.317	0	0	0.403
3 niveles (0,1,2)	0.169	0.339	0.738	0.845
2 niveles (0,1)	0.053	0.215	0.484	0.772

Fig. 6. Tabla de RMSE con diferentes niveles de discretización en red CNN.

4. RED NEURONAL DE PREDICCIÓN FEEDFORWARD

Para la construcción de la red neuronal feedforward, se empleó la misma base de datos de imágenes que se utilizó para el entrenamiento de la red neuronal convolutiva, pero con una organización diferente. Las imágenes de la base de datos fueron ordenadas de la siguiente manera:

La base de datos de entrada para esta red consiste en un vector de datos de 490 píxeles, que representa 10 imágenes de 7x7 píxeles cada una. La primera imagen se organiza dividiendo la matriz en filas de 7 valores, los cuales se organizan de arriba hacia abajo y se anexan al vector de entrada ocupando los primeros 49 valores. Este proceso se repite para las siguientes imágenes hasta tener las 10 imágenes organizadas y obtener los valores de cada uno de los 490 píxeles que se requieren como entrada.

Para la base de datos de salida, se organizaron las imágenes que representan el siguiente instante de cada entrada, de manera que la red fuera entrenada para predecir la siguiente imagen. Se obtuvo un vector de salida que representa el valor de cada una de las filas que conforman la imagen, con una extensión de 49 valores como se puede observar en la Fig(7). Posteriormente, se entrenó la red feedforward con el objetivo de minimizar el error en la predicción Liu et al. (2009) Penteliuc and Frincu (2019).

Es importante destacar que la organización de las bases de datos de entrada y salida es fundamental para el adecuado entrenamiento de la red neuronal feedforward

y para obtener resultados precisos en la predicción de las imágenes de nubosidad.

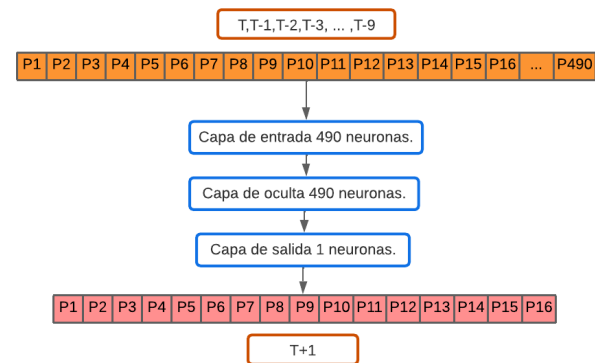


Fig. 7. Estructura de red feedforward.

4.1 Resultados de error obtenidos en red feedforward

Se realizó una evaluación exhaustiva del desempeño de la red feedforward en la predicción de imágenes a largo plazo. Para este propósito, se utilizaron imágenes diferentes a las utilizadas en el entrenamiento, con el fin de evaluar la capacidad de la red para generalizar a nuevos datos.

La evaluación del error en la red feedforward se realizó mediante la generación de predicciones a partir de estas imágenes. Los resultados obtenidos se presentan en la figura siguiente, la cual evidencia que la predicción a un paso en la red feedforward es adecuada y presenta un bajo nivel de error.

Posteriormente, se procedió a estimar la predicción a varios pasos retro alimentando a la red feedforward con la predicción previa, lo que permitió iterar esta acción para obtener predicciones de los siguientes pasos. Los resultados de la predicción a más pasos se presentan en la siguiente Fig(8) donde el eje Y representa el error cuadrático medio y el eje X representa el paso de predicción.

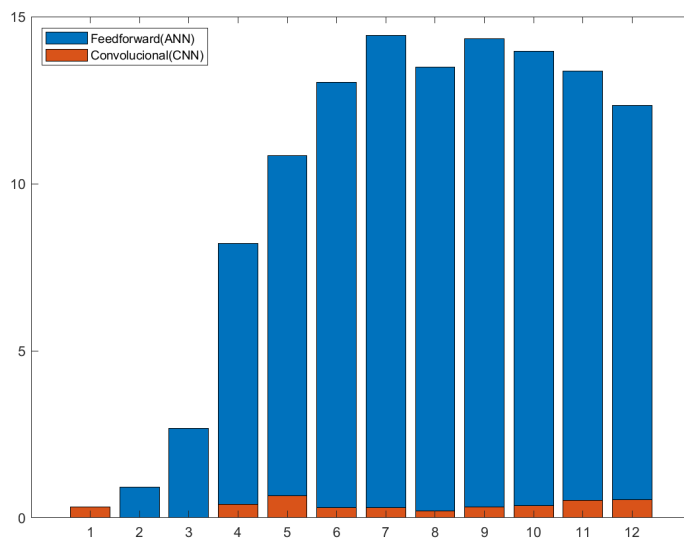


Fig. 8. Error cuadrático medio por ciclo de estimación en red feedforward contra red convolutiva (Discretizada a 4 niveles).

Los resultados obtenidos en esta evaluación sugieren que la red feedforward es capaz de generar predicciones precisas y confiables en el corto plazo. Sin embargo, a medida que se aumenta el número de pasos de predicción, se observa un crecimiento significativo en el error de predicción, lo que resulta en imágenes predichas que no son representativas de la imagen original López Gómez et al. (2020).

Con base en los desarrollos realizados de discretización de píxeles, se generaron otros niveles de discretización para evaluar el desempeño de la red neuronal feedforward de la misma manera que se realizó previamente con la red convolutiva en la predicción de imágenes de nubosidad. El objetivo de este análisis fue observar cómo la variación en los niveles de discretización afecta el rendimiento de la red neuronal en la tarea de predicción Fig(9).

Error en red convolucional de predicción (CNN).				
Tipo de discretización	RMSE a un paso	RMSE a dos pasos	RMSE a tres pasos	RMSE a cuatro pasos
4 niveles (0,1,2,3)	0.317	0	0	0.403
3 niveles (0,1,2)	0.169	0.339	0.738	0.845
2 niveles (0,1)	0.053	0.215	0.484	0.772
Error en red feedforward de predicción (ANN)				
Tipo de discretización	RMSE a un paso	RMSE a dos pasos	RMSE a tres pasos	RMSE a cuatro pasos
4 niveles (0,1,2,3)	0.319	0.914	2.684	8.216
3 niveles (0,1,2)	2.759	7.138	11.313	14.069
2 niveles (0,1)	0.868	1.040	1.133	1.261

Fig. 9. Tabla de error a varios pasos red convolutiva(CNN) contra feedforward(ANN).

5. RED NEURONAL DE AJUSTE PARA RADIACIÓN SOLAR

En este estudio, se utilizó una red neuronal de ajuste con el fin de generar una predicción lo más precisa posible de la radiación solar en un área determinada. Para ello, se recopilieron datos de entrada como la hora solar, la radiación solar estimada para esa hora López Gómez et al. (2020), el día del año y 49 píxeles que representan la imagen de la nubosidad en ese momento.

Para la elaboración de la base de datos de salida, se utilizaron muestras del sensor de radiación solar instalado en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con el fin de ajustar el modelo a las lecturas medidas y obtener una precisión máxima. Es importante destacar que la radiación solar es un factor clave en la generación de energía solar fotovoltaica y térmica, por lo que contar con modelos precisos de predicción es fundamental para la planificación y diseño de proyectos de energía renovable.

La red neuronal de ajuste utilizada en este estudio permitió obtener una predicción de la radiación solar con una precisión satisfactoria, lo que sugiere la efectividad del modelo en la estimación de la radiación solar. Además, se pueden obtener múltiples beneficios prácticos a partir de la predicción de la radiación solar, como la planificación adecuada del uso de la energía solar y la gestión eficiente de la energía eléctrica.

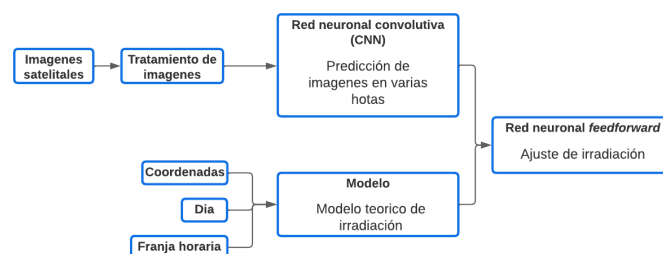


Fig. 10. Esquema del proceso para la predicción de irradiación.

Con el fin de evaluar el desempeño de la red neuronal de ajuste, se utilizaron las imágenes generadas con la red neuronal convolutiva. Esta selección se debió al alto rendimiento que ha demostrado esta red en la predicción a múltiples pasos.

Para la evaluación, se seleccionaron 10 imágenes previas a las 6:00 UTC³ del día para estimar posteriormente las imágenes de nubosidad de las cuatro horas siguientes. Los resultados obtenidos fueron comparados con algunos datos obtenidos por el sensor solar instalado en el IMTA, con el objetivo de validar la precisión de la red neuronal en la tarea de predicción Fig(9).

³ Coordinated Universal Time (Tiempo universal coordinado)

Observando el desempeño obtenido para predicción en la red convolutiva se contrastaron estos datos para poder observar de una mejor manera el desempeño de cada una de las redes Fig(11,9).

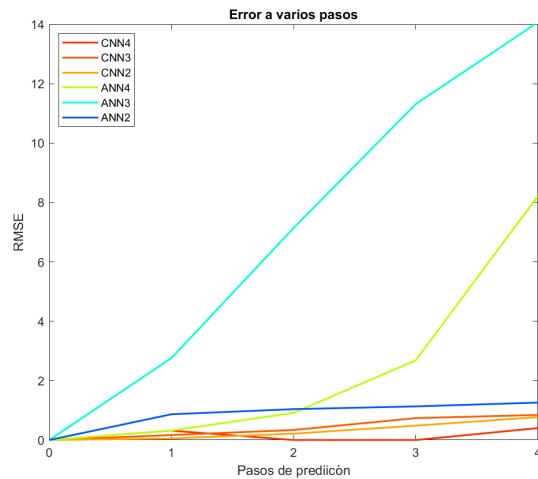


Fig. 11. Gráfica de error de predicción a varios pasos onvolutiva(CNN) contra feedforward(ANN).

6. CONCLUSIONES

El presente estudio se enfocó en analizar el desempeño de diferentes redes neuronales de predicción y su capacidad para producir imágenes representativas de la imagen que se desea predecir. Para este propósito, se realizaron predicciones en varias horas para cada una de las redes neuronales estudiadas.

Los resultados obtenidos indican que la red convolutiva de predicción presentó un error un poco mayor que la red de predicción feedforward en el primer paso de predicción. Sin embargo, al someter las redes a varios pasos de predicción, se observó que el error en la red feedforward creció hasta un punto en el que la imagen predicha dejó de ser representativa Fig(11).

Por otro lado, la red convolutiva presentó un crecimiento de error menor al ser sometida a varios pasos de predicción, lo que permitió que hasta el cuarto paso de predicción aún se obtuvieran imágenes representativas de la imagen que se deseaba predecir. Estos hallazgos sugieren que la red convolutiva de predicción es una opción viable para la generación de imágenes a largo plazo.

Cabe destacar que la predicción de imágenes a largo plazo es un tema de gran relevancia en diversas áreas, como la medicina, la robótica y la vigilancia. La capacidad de generar imágenes representativas de forma precisa y sostenible en el tiempo puede tener un gran impacto en el desarrollo de estas áreas.

En conclusión, el presente estudio evidencia que la red convolutiva de predicción presenta una mayor capacidad para generar imágenes representativas a largo plazo en

comparación con la red de predicción feedforward. Estos resultados abren nuevas posibilidades en el desarrollo de aplicaciones que requieran de la generación de imágenes representativas a largo plazo.

REFERENCES

- Borunda, M., Ramírez, A., Garduno, R., Ruiz, G., Hernandez, S., and Jaramillo, O. (2022). Convolutional and dense ann for cloud kinetics forecasting using satellite images. In *Advances in Computational Intelligence: 21st Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2022, Monterrey, Mexico, October 24–29, 2022, Proceedings, Part I*, 212–224. Springer.
- Choi, M., Rachunok, B., and Nateghi, R. (2021). Short-term solar irradiance forecasting using convolutional neural networks and cloud imagery. *Environmental Research Letters*, 16(4), 044045.
- Khatib, T. and Elmenreich, W. (2016). *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley & Sons.
- Li, X., Zheng, H., Han, C., Zheng, W., Chen, H., Jing, Y., and Dong, K. (2021). Sfrs-net: A cloud-detection method based on deep convolutional neural networks for gf-1 remote-sensing images. *Remote Sensing*, 13(15), 2910.
- Liu, Y., Xia, J., Shi, C.X., and Hong, Y. (2009). An improved cloud classification algorithm for china's fy-2c multi-channel images using artificial neural network. *Sensors*, 9(7), 5558–5579.
- López Gómez, J., Ogando Martínez, A., Troncoso Pastoriza, F., Febrero Garrido, L., Granada Álvarez, E., and Orosa García, J.A. (2020). Photovoltaic power prediction using artificial neural networks and numerical weather data. *Sustainability*, 12(24), 10295.
- Penteliuc, M. and Frincu, M. (2019). Prediction of cloud movement from satellite images using neural networks. In *2019 21st International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNAS)*, 222–229. IEEE.
- Salcedo-Sanz, S., Casanova-Mateo, C., Muñoz-Marí, J., and Camps-Valls, G. (2014). Prediction of daily global solar irradiation using temporal gaussian processes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(11), 1936–1940.
- Su, Y.T., Lu, Y., Chen, M., and Liu, A.A. (2017). Spatiotemporal joint mitosis detection using cnn-lstm network in time-lapse phase contrast microscopy images. *IEEE Access*, 5, 18033–18041.
- Tang, P., Zhang, D., and Li, H. (2022). Predicting permeability from 3d rock images based on cnn with physical information. *Journal of Hydrology*, 606, 127473.
- Uss, M., Vozel, B., Lukin, V., and Chehdi, K. (2020). Efficient discrimination and localization of multimodal remote sensing images using cnn-based prediction of localization uncertainty. *Remote Sensing*, 12(4), 703.
- Wu, J., Yin, X., and Xiao, H. (2018). Seeing permeability from images: fast prediction with convolutional neural networks. *Science bulletin*, 63(18), 1215–1222.

Estrategia de modulación por vector espacial SVPWM para un inversor trifásico con posibilidad de conexión a red

Adan Bravo Torres¹, Abraham Claudio Sánchez², Jesús Darío Mina Antonio³

¹Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
e-mail: m22ce008@cenidet.tecnm.mx

²Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
e-mail: abraham.cs@cenidet.tecnm.mx

³Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
e-mail: jesus.ma@cenidet.tecnm.mx

Resumen: En este artículo se presenta el diseño e implementación de un inversor trifásico basado en una estrategia de modulación por vector espacial SVPWM. El inversor es conectado a una carga resistiva (R) a través de un filtro LCL. Dicho diseño se simula en el software de MatLab Simulink, el cual nos permite verificar el buen funcionamiento del inversor y su técnica SVPWM, lo cual se corrobora a través de mediciones de voltaje y corriente en la carga, mostrando que es posible desfasar la señal de salida para el manejo de potencia activa y reactiva.

Palabras claves: Modulación, SVPWM, Inversor trifásico, Simulink, Potencia activa, Potencia reactiva

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de modulación por ancho de pulso se basan en la comparación de dos señales, una portadora y una de referencia que genera una señal de tipo cuadrada, que son los pulsos que hacen conmutar al inversor.

Las principales ventajas de la modulación de ancho de pulso de vector espacial es lograr una menor generación de armónicos a la salida del inversor, genera menor pérdida en la conmutación de los interruptores, además de tener un amplio rango de modulación lineal, fácil implementación y generación de un control más preciso [1].

El siguiente ejercicio implementa un inversor trifásico, un filtro de elementos pasivos, y una carga de tipo resistiva, únicamente para corroborar el correcto diseño de la modulación, como se muestra en la siguiente figura (Fig.1):

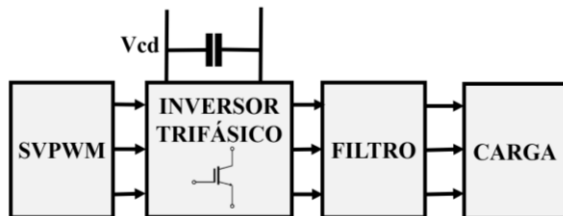


Fig. 1. Diagrama de bloques de la modulación.

1.1 Modulación SVPWM

En este tipo de modulación, se define una señal de referencia con frecuencia angular:

$$\omega = 2\pi f \quad (1)$$

Resulta de la representación α - β (marco de referencia de dos dimensiones en cuadratura) de un sistema trifásico, mediante la transformada de Clarke:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Por otro lado, basado en los ocho estados de conmutación del inversor trifásico (ver Fig.2), se definen 6 vectores activos (desfasados 60°) y 2 vectores nulos (ver Fig.3)

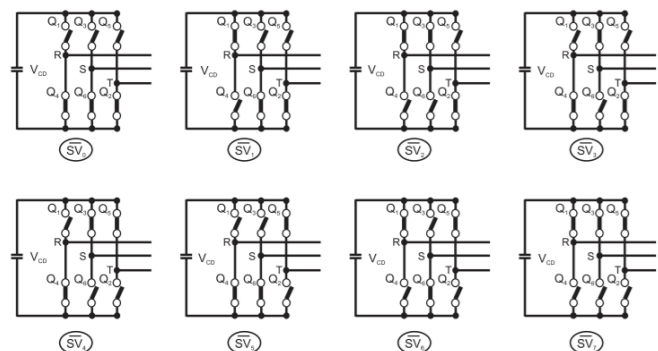


Fig. 2. Estados de conmutación del inversor

La idea es que el vector de referencia se pueda construir, con la combinación adecuada, de los correspondientes vectores activos y nulos, dependiendo de la ubicación del vector de referencia [2].

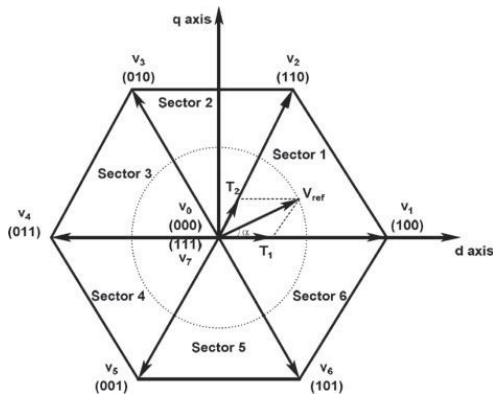


Fig. 3. Vectores de conmutación para el inversor.

2. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN.

2.1 Simulación de SVPWM

Para la implementación de la simulación se utilizaron 3 señales de referencia senoidales desfasadas 120°, dichas señales se transforman a un sistema ortogonal.

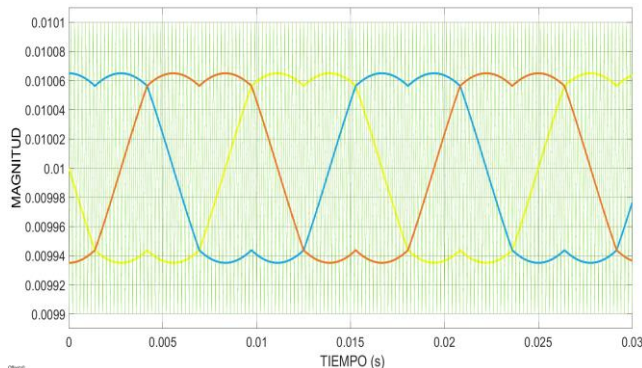


Fig. 4. Señal de referencia y portadora.

Las moduladora se genera por una señal de referencia y una portadora a una frecuencia de 5kHz que dará los estados de conmutación para los interruptores (Fig.4). Para este ejercicio se propone el diseño de un inversor con bus de CD a 450V y un filtro basándonos en la referencia [3] para corroborar el buen funcionamiento del inversor y la modulación. El inversor está conectado a una carga de tipo resistiva, para poder ver la eficiencia del convertidor se coloca una carga de valor pequeño igual a 2Ω .

3. RESULTADOS

En la figura 5, el voltaje (color azul) y corriente (color rojo), se puede observar que la señal no genera armónicos gracias a el filtro implementado, cada línea se encuentra desfasada 120° demostrando que el diseño del filtro y modulación fueron correctamente implementados.

En la figura 6, al modificar las señales de referencia de la modulación se puede provocar un cambio en las señales de

salida de lado de la carga, emulando inyección de potencia activa y reactiva, lo cual muestra las posibilidades de compensación a la red eléctrica (Fig. 6):

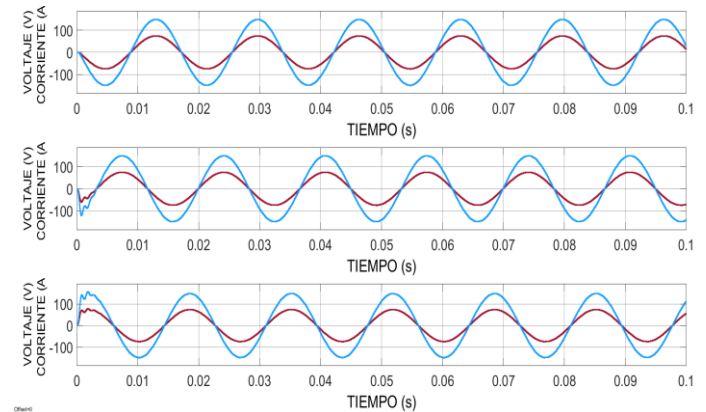


Fig. 5. Señales de voltaje y corriente (potencia activa).

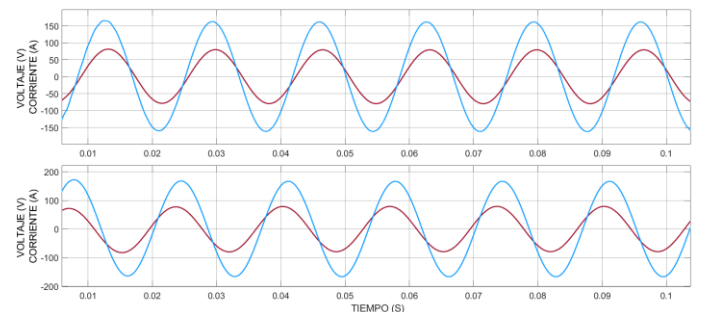


Fig. 6. Potencia reactiva inductiva (arriba) y capacitiva (abajo).

4. CONCLUSIONES

La finalidad de implementar este tipo de simulaciones es poder analizar el comportamiento que tiene la modulación de ancho de pulso de vector espacial (SVPWM) y el uso de filtros de elementos pasivos para poder atenuar o eliminar los armónicos que genere el inversor al momento que se encuentra conmutando. Con este ejercicio también se puede emular la inyección de potencia activa y reactiva para compensación de la energía eléctrica. Esto se puede lograr con el correcto diseño de un control que logre verificar los niveles de voltaje y saber en qué momento debe inyectar cada uno de los parámetros deseados de acuerdo a los estándares de calidad.

REFERENCIAS

- [1] T. P. Ma. Del Carmen, "Convertidor CD-CA conectado a la red eléctrica con funciones de mejora", Tesis de Maestría, CENIDET, Cuernavaca-Morelos, 2022.
- [2] Villegas, J. Tisza, J. (Julio 2019) "Caracterización del método SVPWM con inversor trifásico de dos niveles." Revista ECIPerú No.1 Vol. 16 pp. 22-29
- [3] M.J. Eduardo, "Optimización de un sistema de generación distribuida para mejorar su integración a la red." Tesis de Maestría, CENIDET, Cuernavaca-Morelos, 2021.

Representación Takagi-Sugeno del modelo no lineal de un péndulo H2AT que representa a una persona con lesión en la médula espinal

E. Dominguez-Lagunas* G.-L. Osorio-Gordillo*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado
Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.
e-mail:m22ce058@cenidet.tecnm.mx - gloria.og@cenidet.tecnm.mx

Resumen. Este artículo se centra en proponer una representación no lineal Takagi-Sugeno que puede ser utilizada para el diseño de un esquema de control u observación para estudiar el tratamiento de personas con lesiones en la médula espinal con el objetivo de mejorar su capacidad de movimiento. El modelo se obtiene a partir del análisis de Euler-Lagrange del péndulo H2AT.

Keywords: Representación no lineal Takagi-Sugeno, Modelo H2AT, Euler-Lagrange.

1. INTRODUCCIÓN

La lesión en la médula espinal es una condición que puede tener un gran impacto en la vida de una persona, en la literatura se encuentran distintos trabajos que abordan el estudio de esta problemática. En Cholewicki et al. (1999) se desarrolló un péndulo invertido con resortes lineales que representan al abdomen y grupos de músculos espinales. Por otro lado en Blandeau et al. (2016), introduce un modelo para estabilizar la posición vertical para una persona con lesión completa en la médula espinal, dicho modelo es la variación de un péndulo invertido el cual lleva por nombre péndulo H2AT (Heat 2 Arms and Trunk).

El objetivo principal de este artículo es llevar a cabo la representación de un sistema no lineal a la representación no lineal Takagi-Sugeno para posteriormente poder aplicar algún esquema de control de posición vertical.

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio de este artículo es el péndulo H2AT, el cual representa a una persona con lesión completa en la médula espinal. En la Figura 1. Esquema de caso de estudio (H2AT), se muestra el esquema de dicho sistema:

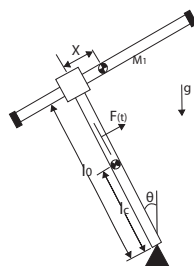


Figura 1. Esquema caso de estudio (H2AT)

Considere la representación dinámica del caso de estudio dado por las siguientes ecuaciones:

$$0 = m_1 \ddot{x}(t) - m_1 l_0 \ddot{\theta}(t) - m_1 x(t) \dot{\theta}^2(t) + m_1 g \sin(\theta(t)) - F(t) \quad (1)$$

$$0 = -m_1 l_0 \ddot{x}(t) + J(x(t)) \ddot{\theta}(t) + 2m_1 x(t) \dot{x}(t) \dot{\theta}(t) - (m_1 l_0 + m_2 l_c) g \sin(\theta(t)) + m_1 g x(t) \cos(\theta(t)) \quad (2)$$

donde $F(t)$ es la fuerza del controlador, m_1 (16.1Kg) y m_2 (26.64kg) es la masa del segmento superior y la masa del tronco respectivamente l_0 (0.477m) y l_c (0.2766m) representan las longitudes del tronco y la longitud del centro de masa del tronco, $x(t)$ es la flexión completa del cuello con ambos brazos estirados y finalmente $\theta(t)$ es una articulación giratoria (articulación lumbosacra). Se obtiene el modelo no lineal en espacio de estados (3):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(x(t))x(t) + B(x(t))f(t) \\ \dot{y}(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde $x(t)$ es el vector de estados del sistema que esta formado por $x(t) = [x(t) \dot{x}(t) \theta(t) \dot{\theta}(t)]^T \in \mathbb{R}^4$. Mientras que el vector de salida dado por $y(t) \in \mathbb{R}^2$. Las matrices A , B y C se definen como:

$$A(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \end{bmatrix}, B(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \text{ y } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

donde:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{-m_1 g l_0 \cos(\theta)}{J - l_0^2 m_1}, & A_{12} &= \frac{-2m_1 l_0 \dot{x}}{J - l_0^2 m_1}, & A_{14} &= \frac{J x \dot{\theta}}{J - l_0^2 m_1} \\ A_{13} &= l_0 g \frac{\sin(\theta)}{\theta} (m_1 l_0 + m_2 l_c) - J g \frac{\sin(\theta)}{\theta}, & A_{21} &= \frac{-m_1 g \cos(\theta)}{J - l_0^2 m_1}, \\ A_{22} &= \frac{-2m_1 x \dot{\theta}}{J - l_0^2 m_1}, & A_{23} &= \frac{l_c m_2 g \frac{\sin(\theta)}{\theta}}{J - l_0^2 m_1}, & A_{24} &= \frac{l_0 m_1 x \dot{\theta}}{J - l_0^2 m_1} \\ B_1 &= \frac{J}{m_1 (J - l_0^2 m_1)}, & B_2 &= \frac{l_0}{m_1 (J - l_0^2 m_1)} \end{aligned}$$

$$J(x(t)) = m_1 (l_0^2 + x^2(t)) + m_2 l_c^2 \quad (4)$$

Cabe recalcar que por simplificación de notación se eliminó la notación $x(t)$ en los términos donde se ve involucrado a la variable J .

3. OBTENCIÓN DE LA REPRESENTACIÓN TAKAGI-SUGENO

Partiendo del modelo (3) se pueden identificar $p = 4$ no linealidades.

$$\begin{aligned} z_1(t) &= \frac{\sin(\theta(t))}{\theta(t)}, \quad z_2(t) = x(t)\dot{\theta}(t) \\ z_3(t) &= \cos(\theta(t)), \quad z_4(t) = x(t)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Considerando un par constante $u(t) = 3N$ podemos determinar el límite superior e inferior de variación de cada no linealidad dando los siguientes resultados:

$$z_1 = \frac{\sin(\theta)}{\theta} \rightarrow [1, 0,1283] \quad (6)$$

$$z_2 = x\dot{\theta} \rightarrow [0,0416, -40,5919] \quad (7)$$

$$z_3 = \cos(\theta) \rightarrow [1, 0,0906] \quad (8)$$

$$z_4 = x^2 \rightarrow [0,9589, 1 \times 10^{-4}] \quad (9)$$

Posteriormente se definen las funciones de ponderación para cada no linealidad, las cuales son:

$$\begin{aligned} \eta_0^1(z_1) &= \frac{z_1 - z_1}{z_1 - z_1}, \quad \eta_1^1(z_1) = 1 - \mu_0^1 \\ \eta_0^2(z_2) &= \frac{z_2 - z_2}{z_2 - z_2}, \quad \eta_1^2(z_2) = 1 - \mu_0^2 \\ \eta_0^3(z_3) &= \frac{z_3 - z_3}{z_3 - z_3}, \quad \eta_1^3(z_3) = 1 - \mu_0^3 \\ \eta_0^4(z_4) &= \frac{z_4 - z_4}{z_4 - z_4}, \quad \eta_1^4(z_4) = 1 - \mu_0^4 \end{aligned} \quad (10)$$

A partir de las funciones de ponderación construimos $2^p = 16$ reglas difusas.

$$\begin{aligned} \phi_1(z_j) &= \mu_0^1 \mu_0^2 \mu_0^3 \mu_0^4, \quad \phi_9(z_j) = \mu_1^1 \mu_0^2 \mu_0^3 \mu_0^4 \\ \phi_2(z_j) &= \mu_0^1 \mu_0^2 \mu_0^3 \mu_1^4, \quad \phi_{10}(z_j) = \mu_1^1 \mu_0^2 \mu_0^3 \mu_1^4 \\ \phi_3(z_j) &= \mu_0^1 \mu_0^2 \mu_1^3 \mu_0^4, \quad \phi_{11}(z_j) = \mu_1^1 \mu_0^2 \mu_1^3 \mu_0^4 \\ \phi_4(z_j) &= \mu_0^1 \mu_0^2 \mu_1^3 \mu_1^4, \quad \phi_{12}(z_j) = \mu_1^1 \mu_0^2 \mu_1^3 \mu_1^4 \\ \phi_5(z_j) &= \mu_0^1 \mu_1^2 \mu_0^3 \mu_0^4, \quad \phi_{13}(z_j) = \mu_1^1 \mu_1^2 \mu_0^3 \mu_0^4 \\ \phi_6(z_j) &= \mu_0^1 \mu_1^2 \mu_0^3 \mu_1^4, \quad \phi_{14}(z_j) = \mu_1^1 \mu_1^2 \mu_0^3 \mu_1^4 \\ \phi_7(z_j) &= \mu_0^1 \mu_1^2 \mu_1^3 \mu_0^4, \quad \phi_{15}(z_j) = \mu_1^1 \mu_1^2 \mu_1^3 \mu_0^4 \\ \phi_8(z_j) &= \mu_0^1 \mu_1^2 \mu_1^3 \mu_1^4, \quad \phi_{16}(z_j) = \mu_1^1 \mu_1^2 \mu_1^3 \mu_1^4 \end{aligned} \quad (11)$$

Finalmente determinamos los modelos locales. Para llevar a cabo este paso se utilizan los valores máximos y mínimos de cada variable de programación, encontrando así $m = 2^p$ modelos locales lineales, obteniendo la representación Takagi-Sugeno:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^m \phi_i(z) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (12)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (13)$$

donde $i = 1, 2, \dots, 2^p$.

4. SIMULACIONES

En esta sección, se presentará una simulación comparativa entre un sistema no lineal y su representación Takagi-Sugeno (T-S). En la Figura (2) se muestra la interacción que existe entre los 16 modelos locales del sistema del péndulo H2AT con una entrada de $3N$. Por otro lado en la Figura (3) se muestra la simulación en lazo abierto del sistema no lineal utilizando el enfoque del sector no lineal Takagi-Sugeno con una entrada de $3N$, donde se muestran los 4 estados del péndulo H2AT que son: Desplazamiento lineal, velocidad lineal, Desplazamiento angular y velocidad angular.

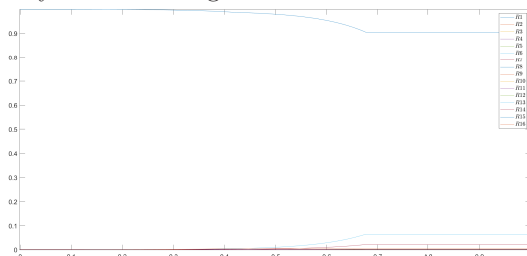


Figura 2. Interacción de los modelos locales.

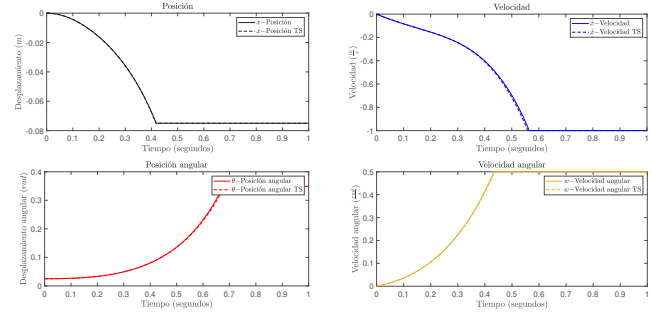


Figura 3. Sistema NL vs sistema Takagi-Sugeno

5. CONCLUSIONES

En este artículo se desarrolló de la representación no lineal Takagi-Sugeno en la modelización del péndulo H2AT. La simulación de la comparación entre el sistema no lineal y su representación Takagi-Sugeno nos permitió evaluar la eficacia de esta técnica en términos de las reglas difusas que se utilizan en la representación. Cabe destacar que se utilizó un par constante para validar el modelo Takagi-Sugeno, una vez obtenido este modelo se podrán diseñar observadores y controladores para el péndulo H2AT utilizando técnicas lineales y de modelos lineales interpolados. Lo que permitirá proponer un esquema de diseño generalizado para esta clase de sistemas, como ventaja sobre el enfoque no lineal. Como consecuencia de esto se obtendrá una ley de control que permita definir el par apropiado para el objetivo de control de regulación.

REFERENCIAS

- Blandeau, M., Estrada-Manzo, V., Guerra, T.M., Pudlo, P., and Gabrielli, F. (2016). Unknown input observer for understanding sitting control of persons with spine cord injury. *IFAC-PapersOnLine*, 49(5), 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.109>. 4th IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences ICONS 2016.
- Cholewicki, J., Juluru, K., and McGill, S.M. (1999). Intra-abdominal pressure mechanism for stabilizing the lumbar spine. *Journal of Biomechanics*, 32(1), 13–17. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(98\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00129-8).
- Nguyen, A., Pan, J., Guerra, T., Blandeau, M., and Zhang, W. (2020). Designing fuzzy descriptor observer with unmeasured premise variables for head-two-arms-trunk system. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 8007–8012. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2227>. 21st IFAC World Congress.
- T.M. Guerra, M. Blandeau, A.N. and Pan, J. (2019). Practical approach of input delay nonlinear systems: Application to spinal cord injury sitting stability. *IFAC-PapersOnLine*, 52(11), 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.001>. 5th IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences ICONS 2019.
- Z., Lendek, T., Guerra, R., Babuška, B., and Schutter (2011). *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 1. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16776-8>.

ESQUEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS PARA CONVERTIDORES MULTINIVEL

Mayo Reyes Alberto E., Vargas Méndez Rodolfo Amalio., Claudio Sánchez Abraham.
Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica
Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62490 Cuernavaca, Morelos.
m21ce042@cenidet.tecnm.mx

RESUMEN.

Este artículo presenta una metodología para un esquema de diagnóstico de fallas en un convertidor de potencia, particularmente un inversor multinivel puente-H en cascada de 5 niveles monofásico. Para muchas de las aplicaciones industriales, como variadores de CA, fuentes renovables, etc., se utiliza un inversor multinivel, los cuales, son una parte importante de esos sistemas. Los inversores multinivel permiten generar voltajes de CA con baja distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) pero requieren un mayor número de interruptores de potencia. Una de las desventajas es la mayor probabilidad de falla en los interruptores de alimentación, por lo tanto, para mejorar la confiabilidad del convertidor, se debe usar un esquema de detección de fallas. La metodología propuesta se basa en un modelo matemático lógico, obteniendo los estados de conmutación de los interruptores, donde dichos estados generan el voltaje de salida saludable al igual que las posibles fallas que puedan causar una avería en el sistema, bajo condiciones de falla de circuito abierto en los interruptores. Del voltaje de salida saludable y las posibles fallas generadas, se calcula el valor eficaz (V_{rms} , por sus siglas en inglés) y THD de las señales, donde dichas características permiten diferenciar entre la señal saludable respecto a la señal con falla mediante una verificación de umbrales. Los resultados de investigación presentados son verificados mediante simulación.

Palabras clave: Puente H en cascada; falla en circuito abierto; diagnóstico de fallas; inversores multinivel.

1. Introducción

En el sector de la generación de energía, los avances en los dispositivos de potencia siguen impulsando una infraestructura de red eléctrica eficiente y fiable. Los dispositivos de energía han ampliado camino en productos de alto valor en diferentes segmentos del mercado como tecnología de la información, accionamientos de motores eléctricos, infraestructura de red, automoción y aeroespacial [1].

En la mayor parte de estas industrias los motores son de gran importancia en el arranque de máquinas o el funcionamiento de las líneas de producción, como también los dispositivos que los controlan llamados convertidores, por esta razón la parte del sistema convertidor-motor forma parte fundamental de los procesos de producción, por lo que se requiere mantenerlos en operación continua y aceptable aún después de que se presente una falla con el propósito de evitar pérdidas económicas o daños que pongan en riesgo el medio ambiente y la integridad física del operador [2].

La operación actual de los procesos industriales requiere de la aplicación de las técnicas de supervisión y del diagnóstico de fallas para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad en la operación de los sistemas. El objetivo principal de las técnicas de diagnóstico de fallas es reconocer comportamientos anormales de los elementos del sistema de forma temprana, así como sus respectivas causas que lo originan a través de las señales medidas en forma experimental o mediante el empleo de modelos matemáticos del sistema [3].

Los convertidores multinivel comunes incluyen un arreglo de interruptores de potencia y capacitores como fuentes de voltaje. Los niveles de voltaje de corriente directa (CD) en la onda de salida están determinados por el número de interruptores que se utilicen, a mayor número de interruptores, el voltaje y la distorsión armónica en la señal de salida serán menores. Los interruptores de los convertidores multinivel sintetizan la señal de salida en varios niveles de CD [4]. Los inversores multinivel presentan varias ventajas sobre el inversor de fuente de voltaje de dos niveles clásico, como voltajes de CA con THD bajo, menos interferencia electromagnética y menos pérdida de conmutación. Se han realizado muchas investigaciones y se han propuesto varias topologías [5-9]. Entre ellos, uno de los más estudiados es el inversor multinivel en puente H en cascada. De hecho, el uso de esta topología ha sido propuesto para varias aplicaciones [10-13]. Sin embargo, uno de los problemas asociados a estos convertidores electrónicos de potencia es su fiabilidad en aplicaciones con requisitos de alta disponibilidad. En este contexto, el uso del diagnóstico de fallas es fundamental.

Este artículo se centra en la característica de falla de interruptor abierto en el inversor multinivel. La falla del interruptor abierto puede surgir debido a la falla en el circuito del controlador de la puerta que causa la falta de disponibilidad del pulso de la puerta o la ruptura interna de la conexión debido al sobrecalentamiento o discontinuidad en las conexiones externas. Esta falla da como resultado la reducción de la capacidad de potencia de salida, corrientes pulsantes y un mayor contenido de armónicos. Como esta falla no conduce a la parada del proceso, puede permanecer sin ser detectada causando la propagación de fallas que conducen a fallas en los componentes asociados, resultando en la parada total del sistema y mayores costos de mantenimiento [14]. Esto afecta negativamente a la fiabilidad de la aplicación por lo cual ha llevado a una gran cantidad de investigación hacia la detección y el diagnóstico de fallas.

Se han introducido varios métodos en el inversor multinivel puente-H en cascada simétrico [16-20] y algunos métodos en asimétrico [15] en el área de detección y diagnóstico de fallas de transistor abierto. En todos estos trabajos, el voltaje de salida del inversor multinivel se ha utilizado como variable de diagnóstico, ya que es la que menos depende de los parámetros de carga [15-20]. Estos trabajos de investigación se centran en los aspectos del diagnóstico de fallas más que en las características de la falla. Para realizar un esquema de diagnóstico de fallas eficiente, es necesario el conocimiento de la falla, el comportamiento de la falla y la anticipación del estrés de voltaje que deben manejar los dispositivos saludables después de una falla. Este documento presenta el modelado de voltaje de salida en configuraciones simétricas del inversor puente-H en cascada de 5 niveles bajo falla de interruptor abierto, los valores de V_{rms} y THD como características para obtener los umbrales.

2. Desarrollo del modelo lógico matemático del inversor de 5 niveles puente H en cascada

2.1. Estados de conmutación de una célula

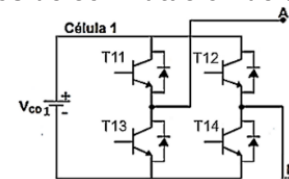


Figura 1: Célula individual puente H.

Tabla 1: Estados de conmutación de una célula

	T11	T12	T13	T14	SALIDA
0	0	0	0	0	Circuito abierto, 0
1	0	0	0	1	Circuito abierto, 0
2	0	0	1	0	Circuito abierto, 0
3	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	Circuito abierto, 0
5	0	1	0	1	Corto circuito
6	0	1	1	0	-1
7	0	1	1	1	Corto circuito
8	1	0	0	0	Circuito abierto, 0
9	1	0	0	1	1
10	1	0	1	0	Corto circuito
11	1	0	1	1	Corto circuito
12	1	1	0	0	0
13	1	1	0	1	Corto circuito
14	1	1	1	0	Corto circuito
15	1	1	1	1	Corto circuito

En la Figura 1 se muestra una célula del convertidor de puente completo el cual consta de 4 interruptores, T11, T12, T13 y T14 al igual que una fuente de corriente directa (CD). Para la conversión de energía es necesario encender y apagar ciertos interruptores, para esto en la Tabla 1 se muestran los distintos estados de conmutación que se pueden aplicar para generar los niveles de los armónicos, al igual que los estados que generan fallas de corto circuito y circuito abierto, en la salida solo se utilizan los estados 3, 6, 9 y 12 para generar dichos niveles, de los cuales los demás se consideran fallas de circuito abierto o corto circuito. A continuación, en la Tabla 2 se muestran ordenados de forma positiva a negativa los estados que hay en la salida, haciendo la sumatoria de las células con los estados de los interruptores que dan forma a los niveles del inversor.

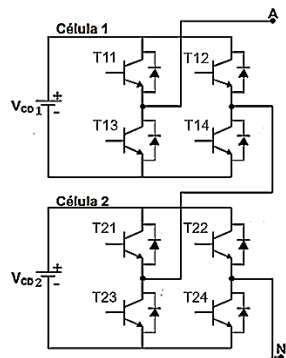


Figura 2: Puente H en cascada, 2 células para 5 niveles.

Tabla 2: Estados de conmutación de 2 células para generar 5 niveles

Número de estado	Célula 1				Célula 2				Salida
	T11	T12	T13	T14	T21	T22	T23	T24	
1	1	0	0	1	1	0	0	1	2vcd
2	1	0	0	1	1	1	0	0	1vcd
3	1	1	0	0	1	1	0	0	0vcd
4	1	1	0	0	0	1	1	0	-1vcd
5	0	1	1	0	0	1	1	0	-2vcd

A continuación, se presentan los resultados de simulación programada en Matlab para el voltaje de salida saludable y las simulaciones con falla, al igual que los valores Vrms y THD de dichas tensiones de salida, para poder realizar el cálculo de los umbrales.

2.2. Programación para la simulación del inversor de 5 niveles puente H en cascada

2.2.1 Parámetros utilizados en la simulación

Frecuencia	60 Hz
Voltaje fuentes	110/2 V
Tiempo de simulación	0.2s
Inicio de la falla	0.1s
Fin de la falla	0.2s

3. Resultados simulación

3.1. Simulación inversor de 5 niveles sin fallas y obtención de THD y Vrms

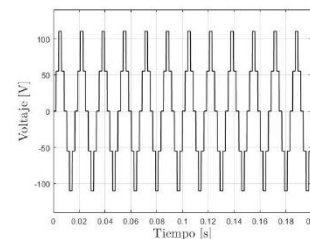


Figura 3: Señal del inversor de 5 niveles sin fallas.

En la Figura 3 se puede observar la señal obtenida en la salida del inversor, donde se obtienen 5 niveles según lo establecido en el programa, en la Ecuación 1 se aplica una fórmula para conocer el valor del Vrms:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X_n|^2} \quad (1)$$

La Ecuación 1 se aplica tomando en consideración los distintos elementos que la conforman, donde se realiza la raíz cuadrada del promedio que se obtiene mediante la sumatoria de la función del voltaje dividido entre el número de términos (periodo).

Por lo tanto, en la Ecuación 2 se muestra el valor nominal obtenido para el sistema presentado:

$$V_{RMS} = 67.4283 \quad (2)$$

Posterior a esto se procede a obtener los valores de THD para saber la distorsión armónica total del inversor con una señal saludable y poderlo diferenciar de las simulaciones donde se genera la falla en los interruptores.

$$THD = \frac{P_1 + P_2 + P_3 \dots P_N}{P_F} \quad (3)$$

La ecuación 3 sirve para la obtención del THD del inversor, en este caso se consideran 7 armónicos, donde la fórmula establece que el THD se obtiene calculando la sumatoria de los armónicos ($P_1 + P_2 + P_3 \dots P_N$) dividida entre la frecuencia fundamental (P_F).

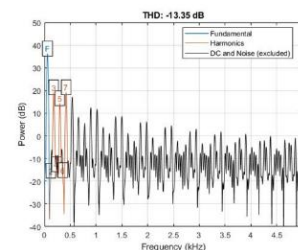


Figura 4: Potencia en frecuencia espectral.

En la Figura 4 obtenemos en simulación los valores de los armónicos de la señal de salida, donde se programa para poder considerar los primeros 7 armónicos juntos con la frecuencia fundamental, donde ya se puede aplicar la ecuación 3 y saber el THD, en este caso se obtiene la distorsión armónica total en dB, para esto es importante aplicar la ecuación 4 para poder pasar a términos de porcentaje (%).

$$THD\% = 10^{\left(\frac{THD\text{ dB}}{20}\right)} * 100 \quad (4)$$

Donde:

$$THD\% = 21.5030468\% \quad (5)$$

3.2. Simulaciones Con Fallas.

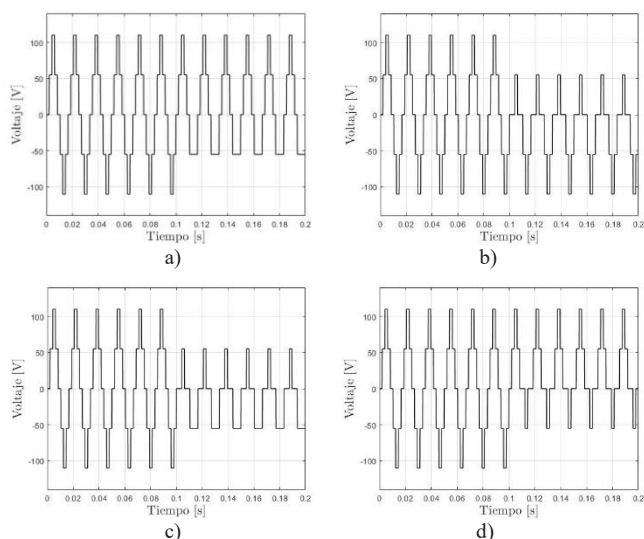


Figura 5: a) Falla en el interruptor T13, b) Falla en el interruptor T14, c) Falla en los interruptores T13 y T14, d) Falla en el interruptor T23.

Ahora se obtiene en la Figura 5 a) aplicando una falla de circuito abierto en la célula 1 en el interruptor 3, obteniendo la señal con falla a partir de 0.1 segundos, al igual que los incisos b), c) y d) con sus respectivas fallas generadas en los interruptores y células asignadas. En la simulación que se realizó para las fallas se pueden variar 3 parámetros en la programación, los cuales son: La célula donde se genera la falla, el interruptor donde se genera la falla y el estado del interruptor.

Para obtener la THD y el Vrms se aplican las mismas ecuaciones utilizadas en la señal de salida sin fallas (Ecuación 1 y 3).

Dónde:

$$THD\% = 22.361452\% \quad (6)$$

$$V_{RMS} = 63.0464\% \quad (7)$$

Y este sería el mismo procedimiento aplicando fallas en los interruptores donde se calcularon los estados con fallas de circuito abierto obtenidas en la Tabla 1, donde se obtiene la siguiente tabla agrupando los valores de THD y Vrms de la señal saludable y las señales con fallas utilizando el método anteriormente mencionado.

3.3. Valores de Vrms y porcentaje de THD

Tabla 3: Valor de Vrms y THD saludable

V_{RMS}	THD
67.4283	20.5030468%

Tabla 4: Valores de Vrms y porcentaje de THD en señales con falla de circuito abierto

Interruptor	V_{RMS}	THD
T11	67.4283	21.50%
T12	63.0464	22.36%
T13	63.0464	22.36%
T14	59.9979	33.57%
T21	67.4283	21.50%
T22	59.9853	26.39%
T23	59.9853	26.39%
T24	63.0464	23.69%
T13T14	55.0275	30.62%
T23T24	55.0137	24.83%

Una vez que se obtuvieron estos valores de Vrms y THD se puede tener un etiquetado de las señales con fallas y diferenciar cuando la señal no se encuentra saludable, se hace una comparativa de los valores obtenidos entre la señal saludable y con falla, y conforme a estos mismo valores se detecta en que célula e interruptor se encuentra la anomalía.

3.4. Tabla de umbrales

En la Tabla 5 se muestra la diferencia entre la señal saludable mostrada en la Tabla 3 con las fallas generadas en los interruptores con sus respectivos Vrms y porcentaje de THD.

Tabla 5: Valores de error Vrms y porcentaje de THD en señales con falla de circuito abierto

Interruptor	Vrms	THD
T11	0	-1.00%
T12	4.3819	-1.86%
T13	4.3819	-1.86%
T14	7.4304	-13.07%
T21	0	-1.00%
T22	7.443	-5.89%
T23	7.443	-5.89%
T24	4.3819	-3.18%
T13T14	12.4008	-10.12%
T23T24	12.4146	-4.33%

Tabla 6: Calculo de porcentaje de error V_{rms} y porcentaje de THD en señales con falla de circuito abierto más pequeños

Error V_{rms}	Error THD
5% de 4.3819 = 0.2191	5% de -0.01 = 0.0005

Los valores más pequeños de error (V_{rms} = 4.3819 y THD = -0.01) obtenidos en la Tabla 5, al ser los valores más cercanos a la respuesta nominal se toman como margen de error. Por lo tanto el 5% de dichos valores (V_{rms} = 0.2191 y THD = 0.0005) se calculan en la Tabla 6, posteriormente los porcentajes calculados se suman para el umbral superior (positivo) y se resta para el umbral inferior (negativo) de cada una de las diferencias de error V_{rms} y THD obtenidos en la Tabla 5. Debido a que hay fallas que tienen las mismas características se clasifican en 7 grupos, donde se observa debajo de cada grupo (Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4, Grupo 5, Grupo 6 y Grupo 7) el valor V_{rms} y THD generados en cada falla como se muestra en la Tabla 4, después están los interruptores que pertenecen a cada agrupación debido a sus valores calculados, y en los últimos dos recuadros están los umbrales calculados.

Tabla 7: Agrupación de interruptores con sus respectivos valores de V_{rms} , THD y umbrales superiores e inferiores

Grupo 1		Grupo 2	
V_{RMS} 67.4283	THD 21.50%	V_{RMS} 63.0464	THD 22.36%
T11 / T21		T12 / T13	
V_{RMS} -5%: -0.2191	V_{RMS} +5%: 0.2191	V_{RMS} -5%: 4.1628	V_{RMS} +5%: 4.6009
THD -5%: -1.05	THD +5%: -0.95	THD -5%: -1.91	THD +5%: -1.81
Grupo 3		Grupo 4	
V_{RMS} 59.9853	THD 26.39%	V_{RMS} 59.9979	THD 33.57%
T22 / T23		T14	
V_{RMS} -5%: 7.2239	V_{RMS} +5%: 7.443	V_{RMS} -5%: 7.6494	V_{RMS} +5%: 7.2113
THD -5%: -5.94	THD +5%: -5.84	THD -5%: -13.12	THD +5%: -13.12
Grupo 5		Grupo 6	
V_{RMS} 63.0464	THD 23.69%	V_{RMS} 55.0275	THD 30.62%
T24		T13T14	
V_{RMS} -5%: 4.1628	V_{RMS} +5%: 4.6009	V_{RMS} -5%: 12.1817	V_{RMS} +5%: 12.6199
THD -5%: -3.23	THD +5%: -3.13	THD -5%: -10.17	THD +5%: -10.07
Grupo 7			
V_{RMS} 55.0137	THD 24.83%		
T23T24			
V_{RMS} -5%: 12.1955	V_{RMS} +5%: 12.6337		
THD -5%: -4.38	THD +5%: -4.28		

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó el modelado del voltaje de salida del inversor multinivel monofásico en cascada de 5 niveles con condiciones de falla en interruptor abierto. Por lo tanto, este método se puede utilizar para el modelado de las condiciones de falla de interruptor abierto para la falla de conocimiento, los comportamientos de falla y la anticipación del estrés de voltaje que deben manejar los dispositivos saludables después de una falla. Se logró identificar 7 grupos de fallas con el cálculo de los umbrales, por lo que la detección permite observar la celda y el interruptor donde se presenta la falla. Al haber fallas que tienen los mismos valores en los umbrales limita saber con precisión donde ocurre una falla. Para trabajos futuros se puede explorar otras características a parte del V_{rms} y THD que ayuden a diferenciar e identificar fallas en los interruptores.

Referencias

- [1] P. L. Hower, S. Pendharkar, And T. Efland, "Current Status And Future Trends In Silicon Power Devices," In 2020 International Electron Devices Meeting, 2020, pp. 13.1. 1-13.1. 4: IEEE.
- [2] R. A. V. Méndez, "Convertidor Multinivel En Cascada Con Emulación De Fallas En Circuito Abierto En Los Interruptores," TESIS DE MAESTRÍA CENIDET, 2015.
- [3] J. A. Alquicira, "Diagnóstico De Fallas En Un Inversor A Partir De Los Tiempos De Conmutación En Los Dispositivos Semiconductores," DOCTORADO, CENIDET, 2004.
- [4] V. Chinnaiyan, J. Jerome, and J. Karpagam, "An FPGA based hardware algorithm implementation for cascaded multilevel inverters," Pacific Journal of Science and Technology (PJST), vol. 11, no. 2, pp. 101–106, 2010
- [5] J. Rodriguez, J. S. Lai, and F. Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, control and applications", IEEE Trans. on Industrial. Application, vol. 49, no. 4, pp.724-738, 2002.
- [6] I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir, "Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes", Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 2, pp. 1114–1128, February 2011.
- [7] I. D. Pharne, Y. N. Bhosale, "A review on multilevel inverter topology", International Conference on Power, Energy and Control, pp.700-703, Feb. 2013.
- [8] E. Can, "Novel high multilevel inverters investigated on simulation", Electrical Engineering, pp. 1–6, 2016.
- [9] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez, J. I. Leon, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, pp. 2553-2580, 2010.
- [10] W. Jiang, L. Huang, L. Zhang, H. Zhao, L. Wang, W. Chen, "Control of Active Power Exchange With Auxiliary Power Loop in a Single-Phase Cascaded Multilevel Converter-Based Energy Storage System", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 32, no. 2, pp. 1518 - 1532, Februarya 2017.
- [11] J. Chavarria, D. Biel, F. Guinjoan, C. Meza, J. J. Negroni, "EnergyBalance Control of PV Cascaded Multilevel Grid-Connected Inverters Under Level-Shifted and Phase-Shifted PWMs", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, n° 1, pp. 98-111, January 2013.
- [12] D. E. Soto-Sanchez, R. Pena, R. Cardenas, J. Clare, P. Wheeler, "A Cascade Multilevel Frequency Changing Converter for High-Power Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, n° 6, pp. 2118-2130, June 2013.
- [13] V. M. E. Antunes, V. F. Pires, J. Fernando Silva, "Narrow Pulse Elimination PWM for Multilevel Digital Audio Power Amplifiers Using Two Cascaded H-Bridges as a Nine-Level Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 425-434, March 2007.
- [14] N. Raj, S. George and G. Jagadanand, "Open transistor fault detection in asymmetric multilevel inverter," Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015 IEEE International Conference on, Kozhikode, 2015, pp. 1-5.
- [15] N. Raj, S. George and G. Jagadanand, "Open transistor fault detection in asymmetric multilevel inverter," Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015 IEEE International Conference on, Kozhikode, 2015, pp. 1-5.
- [16] Lezana, P.; Aguilera, R.; Rodriguez, J., "Fault Detection on Multicell Converter Based on Output Voltage Frequency Analysis," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.56, no.6, pp.2275,2283, June 2009.
- [17] Ventura, R.P.S.; Mendes, A.M.S.; Cardoso, A.J.M., "Fault detection in multilevel cascaded inverter using park's vector approach with balanced battery power usage," Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on , vol., no., pp.1,10, 2011.
- [18] Sedghi, S.; Dastfan, A.; Ahmadyfard, A., "Fault detection of a seven level modular multilevel inverter via voltage histogram and Neural Network," Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on , vol., no., pp.1005,1012, May 30 2011-June 3 2011.
- [19] Fernao Pires, V.; Foito, D.; Sousa, D.M.; Martins, J.F., "Fault detection on multilevel power converter based on mass center of the voltage pattern," Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on , vol., no., pp.576,581, 13-17 May 2013.
- [20] A. Anand, N. Raj, S. George and Jagadanand G, "Open switch fault detection in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter using normalised mean voltages," 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, 2016, pp. 1-6.



CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Biodigestores para gestionar residuos biogénicos en zonas urbanas: Análisis numérico

Jorge Flores Velázquez*, C. Ernesto Angular Rodríguez**

*Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Posgrado en Hidrociencias, Texcoco Estado de México, México, jorgelv@colpos.mx.

** TecNM Campus Los Reyes, Carretera Los Reyes-Jacona km. 3., Los Reyes Michoacán, México, ernesto.ar@losreyes.tecnm.mx.

Resumen: Las ciudades se han convertido en el mayor consumidor de recursos naturales. Todos los organismos vivos contienen 95% de bioelementos primarios basadas en cadenas de C-O-N-H. Los recursos biogénicos que se generan cada día, constituyen una de las principales cargas en el proceso de descomposición. Este trabajo muestra el funcionamiento de un biodigestor y se analiza numéricamente la viabilidad de su uso para la gestión de desechos biogénicos. Se construye un modelo numérico basado en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y se simula el movimiento de un digestor con la idea de contemplar su uso en la reducción de desechos urbanos. Las variables críticas para el diseño de un biodigestor son las dimensiones y la geometría. Los resultados indican que el funcionamiento está supeditado a la velocidad de flujo y la identificación de espacio muerto. CFD es una herramienta numérica que mediante simulaciones genera información detallada del funcionamiento del modelo prototipo. La detección de zonas de baja o nula velocidad, implica ineficiencia en la digestión y por lo tanto permite proponer alternativas para eliminarlas.

Palabras clave: Biomasa, nexo agua-energía-oxígeno, tratamiento residuos orgánicos,

Abstract: Cities have become the largest consumers of natural resources. All living organisms contain 95% primary bio elements based on C-O-N-H chains. The biogenic resources that are generated every day constitute one of the main loads in the decomposition process. This work shows the operation of a biodigester and analyzes the feasibility of its use for biogenic waste management. Computational Fluid Dynamics (CFD) is used as an analysis tool to show the operation of a biodigester. The critical variables for the design of a biodigester are the dimensions and geometry. Operation is dependent on flow velocity and dead space identification. CFD is a numerical tool that through simulations generates detailed information on the operation of the prototype model. The detection of zones of low or no speed, allows to propose alternatives to eliminate them.

Keywords: Biomass, water-energy-oxygen nexus, organic waste treatment,

1. INTRODUCTION

La generación de energía a partir de biomasa, es una actividad con un desarrollo que evoluciona como alternativas económicamente productivas ante los retos energéticos. Entre las tendencias en el ámbito pecuario en diversas latitudes consiste en intensificar la producción animal que va siempre acompañada de producción de un excedente de estiércol, lo que a su vez implica una generación de desechos que se acumulan y contaminan el medio ambiente. Pero que al mismo tiempo, representa un nicho de oportunidades para la generación de bioenergía.

La digestión anaeróbica de estiércol animal y lodos ofrece beneficios por la mejora de sus cualidades fertilizantes, la reducción de olores y agentes patógenos y la producción de un combustible renovable, el biogás (Angenent et al., 2002).

El proceso de digestión anaeróbica (DA) es una serie de procesos combinados y complejos en los que diferentes residuos son transformados principalmente en una mezcla compuesta de metano e hidrógeno que recibe el nombre de biogás (Valle-Guadarrama et al., 2011).

La utilización de biodigestores ofrece ventajas para la producción de energéticos. El objetivo de la digestión anaeróbica, es la destrucción de sólidos volátiles por

microorganismos en ausencia del oxígeno (Meroney and Colorado, 2008). La digestión anaeróbica es un proceso común para estabilizar y reducir los excesos, por ejemplo, de lodos en una planta tratadora de aguas residuales; en explotaciones agropecuarias permite el tratamiento de los desechos al extraer una proporción de la energía que contienen. Así, por ejemplo, el uso del biogás para la generación de electricidad otorga un valor adicional al empleo de biodigestores en las empresas agropecuarias.

El proceso de transformación anaeróbica tiene más de una implicación, y su efectividad está en función de aspectos como la materia prima (alimento), pH, temperatura, potencial de reducción, tiempo de retención hidráulica de sólidos y las características de mezclado (Terashima, et al., 2009). El mezclado es una de las actividades críticas en el proceso de transformación, una mezcla uniforme reduce la estratificación, permite una mejor dispersión del sustrato, si la mezcla no es adecuada la eficiencia en la digestión es reducida (Hendricks, 2006).

1.1 Análisis CFD y desempeño físico

Al diseñar un sistema digestor anaeróbico, deben tenerse en cuenta el volumen a remover en relación a la capacidad de la bomba; el tiempo de retención hidráulica referida a volumen del tanque y la tasa de entrada de lodos y el gradiente de velocidad que relaciona la potencia de la bomba, el volumen del tanque y la viscosidad del lodo (Meroney and Colorado, 2008).

El procedimiento de diseño de un biodigestor contempla; una parte está basado en los cálculos de la carga orgánica volumétrica del influente como una función de temperatura e intensidad de entrada. No obstante, factores tales como sedimentación, biogás y acumulación de lodos pueden ejercer influencia en el comportamiento hidrodinámico del sistema y por lo tanto en su eficiencia de remoción. En general se presume el predominio de flujos mixtos al interior del biodigestor y su descripción sumamente compleja, motivo por el cual se intenta una discretización numérica del mismo, y específicamente usando Dinámica de Fluidos Computacional en lo sucesivo CFD.

Diferentes estudios se han realizado en mejorar configuraciones hidrodinámicas mediante CFD (Vesvikar & Al-Dahhan, 2005; Meroney & Colorado, 2009; Terashima et al., 2009; Yu et al., 2011; Bridgeman, 2012; Wu, 2010; Wu & Chen, 2011). CFD permite confirmar la eficiencia de mezclado del biodigestor, el cual a su vez depende de factores de diseño, tales como volumen, caudal de entrada, potencia de la bomba, etc. Además, si el desempeño después de la construcción es el adecuado y corregir problemas.

La visualización de los flujos proporciona la oportunidad de evaluar condiciones de frontera y un mejor entendimiento del proceso.

1.2 Creación del Modelo Numérico y simulación numérica

Para inferir la dinámica del flujo, CFD utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes, expresadas como un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido, pudiendo ser aplicadas para describir flujos en la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y en general, cualquier fenómeno donde interviene fluidos (aire/agua).

Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Haciendo esto se obtiene la llamada *formulación integral* de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial se manipulan aplicando diferentes teoremas matemáticos, llegando así a la llamada *formulación diferencial*, que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden describirse en términos integrales, sin embargo, es la deducción diferencial la que permite por medio de ecuaciones en derivadas parciales no lineales una aplicación práctica, que para efectos de este análisis adoptan la siguiente forma:

Ecuación de continuidad:

Para $\varphi = 1$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momento:

Para $\varphi = u_i$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \rho g_i \quad (2)$$

Ecuación de energía:

Si $\varphi = h$ (entalpía)

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial P}{\partial T} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

Donde u_i es el componente de la velocidad en la dirección- i (m s^{-1}), x_i indica el flujo en la dirección- i , (ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}), P es la presión (Pa), g_i es cualquier campo de aceleración, en este caso la aceleración de la gravedad en la dirección i (m s^{-2}), h representa la entalpía del fluido (J kg^{-1}), k es el coeficiente de conductividad del aire ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), T es la temperatura absoluta del fluido ($^{\circ}\text{K}$), y (τ es la viscosidad molecular del fluido ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$).

No se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones, y salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas no es posible hallar una solución analítica; por lo que en muchas ocasiones se ha de recurrir al análisis numérico para determinar una solución. Su deducción es típicamente explicada a través de un balance de masa y energía sobre un volumen de

control, y aplicada a un invernadero puede ser expresada como Ec. 4 (Anderson, 1995).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (4)$$

en la cual ρ es la densidad (kg m^{-3}), t es el tiempo (s) ∇ es el operador divergencia y Γ el coeficiente de difusión, $\mathbf{u}$ el vector de velocidad y S el termino fuente. La variable ϕ es una forma de variable dependiente, pudiendo ser masa, velocidad, factor químico o temperatura, y describe las características del flujo en una localización puntual en un tiempo específico, en un espacio tridimensional sería $\phi = \phi(x, y, z, t)$.

1.3 Modelado del flujo del fluido

El movimiento del fluido estará basado en un gradiente de temperatura y en consecuencia, fenómenos de transporte de masa por convección; dos modelos son básicos para el análisis de este fenómeno, Modelo de flotación para convección natural, el cual considera la variación de la densidad como función de la temperatura, el modelo de Bousinesq que ha dado resultados adecuados está dado por Ec. 5 (Boulard and Wang, 2002):

$$\rho = \rho_i [1 - \beta (T - T_i)] \quad (5)$$

donde ρ es la densidad (Kg m^{-3}); β es el coeficiente de expansión térmica (K^{-1}) y T es la temperatura (K).

El movimiento del aire asume una mezcla de líquido, vapor y gases no consumibles, la ecuación estándar que gobierna el modelo de mezcla y el modelo de turbulencia de mezcla describe el flujo de la fracción de vapor de masa (f) puede ser escrita como Ec. 6 (ANSYS, 1997)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} f) = \nabla \cdot (\gamma \nabla f) + R_e - R_c \quad (6)$$

donde ρ es la densidad de la mezcla (kg m^{-3}), $\mathbf{v}$ es el vector de velocidad (m s^{-1}), γ es el coeficiente efectivo de intercambio de intercambio y R_e , R_c son términos incluidos en la tasa de generación de vapor y condensación, (tasa de cambio de fase)

2. MATERIALES Y METODOS

El proceso de simulación involucra básicamente tres etapas que corresponde a igual número de programas para su ejecución y control y que puede ser resumida como 1,2 y 3:

1. **Construcción de la geometría.** Con base al prototipo del biodigestor por simular se construye su geometría donde se incluyen los componentes del mismo por simular, condiciones de frontera y sistemas de control. Para el desarrollo de esta actividad existen diversos

programas que permiten su creación, concretamente en este proyecto se usó Design Model, del programa comercial workbench.

2. **Mallado de la geometría.** Una vez definida la geometría, el modelo debe subdividirse en un numero finito de elementos en este caso tridimensionales a los cuales se aplican las ecuaciones de balance y transferencia para modelar los flujos. Ec. 1. 2 y 3. Un aspecto relevante a tomar en cuenta aquí es la dimensión de los elementos en gran parte dependerá del modelo de turbulencia a usar y el número de Reynolds, con ello se pretende captar los movimientos del flujo en la mayoría de las escalas; esta actividad se pretende desarrollar con Meshing Model.
3. Simulación y presentación de resultados. En esta etapa se definen los modelos a simular, tales como especies, transferencia de energía, turbulencia, etc. y se inicializa el caso a unas condiciones de frontera específica; se fijan los valores mínimos y cuando los residuales alcanzan este valor, se dice que se ha llegado a una solución y en consecuencia se está en condiciones de pasar al pos proceso donde se obtienen valores escalares, vectoriales y gráficos de la distribución espacial del flujo ya algunas de sus propiedades; en este caso específico se pretende usar Fluent para el procesamiento.

Existe diferentes algoritmos de solución, sin embargo, el más ampliamente usado es el método SIMPLE (Semi Implicit Method por Pressure Linked Equations), el cual consiste principalmente en los siguientes puntos (Patankar, 1980):

1. Proponer un campo inicial de presión.
2. Utilizando la presión sugerida, se resuelven las ecuaciones de momento para valores de prueba de u , v y w .
3. Resolver la ecuación de corrección de presión, lo cual corrige la presión para crear el campo de velocidad que cumple con la ecuación de conservación de masa (continuidad).
4. Calcular el campo de presión mediante la adición de la corrección en la presión del paso 3, sugerido para el campo de presión del paso 1.
5. Calcular u , v y w a partir sus valores de prueba en el paso 2 y la corrección de la velocidad.
6. Tomar la presión del paso 4 como una nueva presión sugerida y regresar al paso 2, iterando hasta obtener la convergencia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 1a y 1b muestran la distribución espacial de los vectores de velocidad de la mezcla, que origina la entrada de dos soluciones, bajo características fluidas diferentes. De acuerdo a las hipótesis planteadas se trata de un flujo turbulento, cuyas fuerzas centrífugas favorecen la separación de las emulsiones. El aumento en las velocidades a la salida del digestor, provoca un cambio en la viscosidad de la mezcla y en consecuencia su capacidad de fluir.

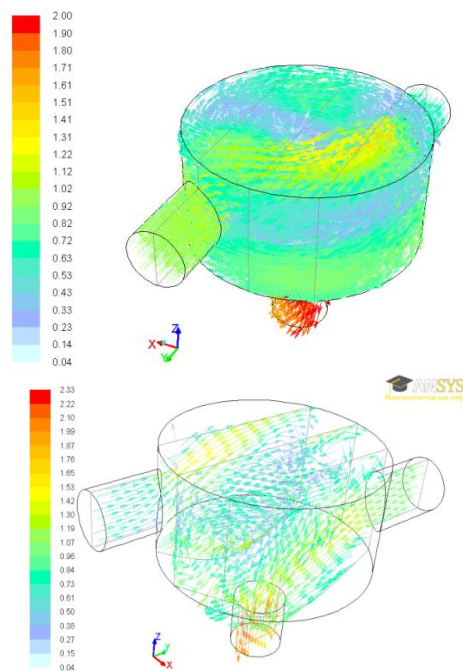


Figura 1. Detalle de los vectores de velocidad de mezcla (m s^{-1})

Como consecuencia de las condiciones de frontera y características de flujo, en las figuras 2 a y b, se muestra la distribución de temperaturas y densidad correspondiente. Un parámetro para cualificar el proceso es la uniformidad en el mezclado lo que a su vez estará en función del contenido de las soluciones, en este caso, se considera que bajo las condiciones ensayadas el proceso de mezclado es adecuado, no obstante, se hace necesaria modelar el proceso bajo condiciones críticas de densidad para poder extrapolar los resultados.

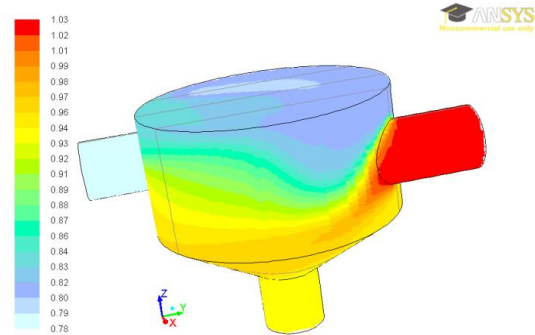
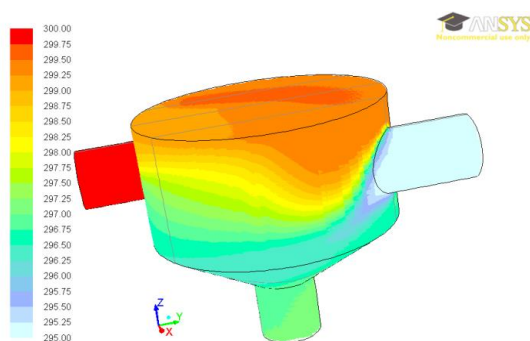


Figura 2. Contornos de Temperatura (K) y densidad (kg m^{-3}) de la mezcla.

Este es fue un prototipo para el análisis del mezclado; sin embargo, se han construido modelos diferentes, donde por la reología del fluido origina espacios de baja velocidad o muertos (Figura 3), donde la densidad de sí mismo impide el flujo; en estos casos es importante identificarlos con el fin de mejorar el diseño y en su caso la proporción en la constitución del fluido, y con ello favorecer la Digestión Anaeróbica (DA).

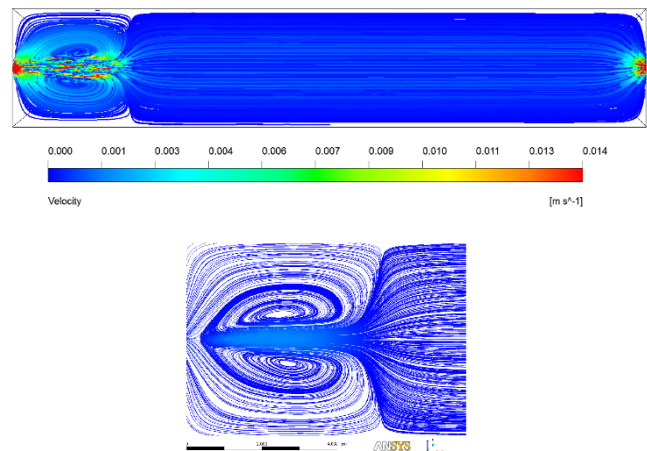


Figura 3. Dinámica del flujo y espacios muertos

Determinación de espacio muerto

En un digestor tipo reactor, se realizó el análisis del flujo; La Digestión Anaeróbica (DA) está afectada por su tiempo de retención en el reactor y el grado de contacto entre el sustrato de entrada y una población bacteriana viable, parámetros en función del régimen hidrodinámico o mezclado en los reactores (Espinosa-Solares *et al.*, 2008).

Para definir un espacio muerto se utilizó el concepto de tiempo de retención hidráulica (HRT). De acuerdo con Levenpiel (2001), el HRT es el tiempo que le toma al material realizar el recorrido desde la entrada hasta la salida del digestor, matemáticamente se define como ec 7:

$$\frac{v}{Q} = HRT \quad (7)$$

Y

$$v_{\text{muerto}} \leq \frac{Long.Re\ acc}{\sqrt{3}(HRT)} \quad (8)$$

Donde V es el volumen total del digestor y Q es el flujo volumétrico de entrada al digestor.

El flujo volumétrico Q provoca que el material tenga una determinada velocidad promedio dentro del digestor, cuya magnitud es resultado del vector $\vec{v}$ que tiene componentes en x , y , z (u, v, w)), por lo tanto, para calcular la velocidad límite para definir un espacio muerto se utilizó la ec 8, Por lo tanto, se consideró como espacio muerto aquellas regiones donde $\vec{v} \leq V_{\text{muerto}}$.

CONCLUSIONES

Se construyó un modelo computacional para el análisis del proceso de mezclado de una solución ideal. Se usó Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para simular las características del flujo. El resultado de la simulación muestra una primera aproximación sobre las características del mezclado en un digestor, factor primordial en el proceso de diferenciación de dos soluciones (lodos) de viscosidad variable.

En el proceso de Digestión Anaeróbica, las características del fluido (mezcla), define la riqueza del contenido de gases susceptibles de extraer, y en consecuencia las características físicas del proceso de co digestión.

La dinámica de fluidos es una herramienta para el análisis en la eficiencia de los flujos necesarios en la separación de soluciones, uno de los aspectos por mejorar es la discretización del modelo de Cross y acoplarlo al modelo de la potencia.

REFERENCIAS

- Angenent**, L.T., Karim, K., Al-Dahhan, M.H., Wrenn, B.A., Domínguez-Espinosa, R., (2004). "Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater". *Trends Biotechnol.* 22, 477–485.
- Anderson**, J.D. (1995). *Computational Fluid Dynamics*. ISBN: 978-3-540-85055-7, McGraw-Hill, US.
- Boulard**, T. y Wang, S. (2002). «Radiative and convective heterogeneity in a plastic tunnel: consequences on crop transpiration». *Plasticulture*, 121 : 23-35.
- Bridgeman**, J. 2012. "Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester". *Advances in Engineering Software*, 44(1), 54-62.
- Espinosa-Solares**, T., Morales-Contreras, M., Robles-Martínez, F., García-Nazariega, M., Lobato-Calleros, C. (2008). "Hydrodynamic Characterization of a Column-type Prototype Bioreactor". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 147(1-3), 133-142.
- Hendricks**, D., 2006. *Water Treatment Unit Processes: Physical and Chemical*. CRC Publishers, 1266 pp.
- Levenspiel** O (1999) *Chemical reaction engineering*, third ed. Wiley, New York
- Meroney**, R. N. and Colorado, P.E. (2009). "CFD simulation of mechanical draft tube mixing in anaerobic digester tanks". *water research* 43: 1040–1050.
- Patankar**, S., (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, New York.
- Terashima**, M., Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H., Takahashi, H., Li, Y.Y. and Noike, T. (2009). "CFD simulation of mixing in anaerobic digesters". *Bioresource Technology* 100 (2009) 2228–2233
- Valle-Guadarrama** S, Hernández-Álvarez RL, Covarrubias-Gutiérrez I. (2007). "Modelado de las velocidades internas de calentamiento y enfriamiento de frutas. Caso: Limón mexicano". *Rev Fitot Mex* 30:61–68.
- Vesvikar**, M.S., Al-Dahhan, M. 2005. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD. *Biotechnology and Bioengineering*, 89(6), 719-732.
- Wu**, B. (2012). "Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems". *Computers and Electronics in Agriculture*(0).
- Wu**, B., Chen, Z. (2011). "An integrated physical and biological model for anaerobic lagoons". *Bioresource Technology*, 102(8), 5032-5038.
- Yu**, L., Ma, J., Chen, S. (2011). "Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester". *Bioresource Technology*, 102(2), 1012-1018.

Análisis de revisiones sistemáticas sobre las tecnologías inteligentes utilizadas en las industrias de fabricación

Karime Baltazar Alcaraz*, Olivia Maquinay Díaz*, Alicia Martínez-Rebollar*

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Internado Palmira S/N,
C.P. 62490. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México
(e-mail: {m22ce075, olivia.md, alicia.mr} @cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: La revisión sistemática se conoce como una búsqueda científica que lleva a cabo diversos pasos para la recolección, organización y resumen de información sobre un tema determinado, la cual permite reunir información de manera organizada y así comprender algún tema o responder una pregunta específica de información. Por lo tanto, en esta investigación se presenta el estado del arte recopilado por medio del análisis de algunas revisiones sistemáticas que abordan las distintas tecnologías inteligentes que utilizan las industrias. Este estudio tiene como objetivo mostrar las principales tendencias tecnológicas y los impactos provocados con la adopción de tecnologías inteligentes. No obstante, los hallazgos de este análisis indican que el tema requiere mayor investigación para su aplicación eficiente ya que existen muchas tendencias desarrolladas en base a la tecnología inteligente, ya que no se menciona de manera específica si son utilizadas adecuadamente o no.

Palabras clave: Tecnologías inteligentes, industria, sostenibilidad, revisión sistemática

1. INTRODUCCIÓN

Las Tecnologías Inteligentes ayudan analizar una gran cantidad de datos para tomar acciones, considerado esto como un nuevo paradigma que hace que el trabajo sea más inteligente y esté más conectado, brindando velocidad y flexibilidad a través de la introducción de la innovación digital (S, B., & L, R. 2020). Sin embargo, las industrias en estos tiempos se enfrentan a diversos desafíos para tomar acciones que permitan el uso de estas tecnologías en sus procesos. Por ejemplo, falta de comprensión y visión común entre los empleados, dificultades para adaptar las rutinas y procesos de trabajo tradicionales a la transformación digital, complejidad tecnológica creando incertidumbre en el caso de negocio, etc.

De esta manera, para que exista una adaptación digital en las industrias deben haber cambios considerables dentro de ellas, como por ejemplo: un modelo de madurez, que de manera preliminar sea construido en torno a tres principios generales: cultivar personas digitales para impulsar la implementación de fábricas inteligentes, introducir procesos ágiles los cuales proporcionan flexibilidad para redirigir el esfuerzo a medida que surgen nuevas tecnologías y nuevas oportunidades y configurar

tecnologías modulares para gestionar la complejidad de los sistemas digitales (R, Parida, Leksell, & Petrovic, 2018).

Entonces, para que las industrias tengan un buen manejo de los recursos y puedan optimizar sus procesos, se puede decir que un elemento clave para lograrlo, es la adopción de tecnologías de vanguardia, que con la migración de datos se pueden dotar dispositivos para que realicen ellos las actividades por medio de la automatización y así aprovechar las ventajas que esto ofrece.

El objetivo de la presente investigación es demostrar de manera clara cuáles son las tecnologías que utilizan las industrias, ya que la amplitud del tema debe estudiarse por la tendencia actual que se está atravesando con esta revolución industrial 4.0, y sobre todo conocer lo que hoy en día facilita las actividades industriales de fabricación, para la mejora social, económica y ambiental.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta los fundamentos teóricos. En la sección 3 se muestra el uso de las tecnologías inteligentes en la industria. La Sección 4 detalla un análisis de las revisiones sistemáticas. La sección 5 muestra las lecciones aprendidas. Finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En esta sección se dan a conocer los principales conceptos y teorías utilizadas en esta investigación.

2.1 Revisiones sistemáticas

Es una búsqueda detallada y exhaustiva de información, la cual responde a una pregunta de investigación sobre un tema en específico. Para el desarrollo de la misma se usan métodos para plantear lo que se puede expresar de manera confiada respecto a la base de dichos estudios investigados.

Una revisión sistemática tiene como objetivo reunir toda la evidencia empírica que cumple unos criterios de elegibilidad previamente establecidos, con el fin de responder una pregunta específica de investigación, utilizando métodos sistemáticos y explícitos, que se eligen con el fin de minimizar sesgos, aportando así resultados más fiables a partir de los cuales se puedan extraer conclusiones y tomar decisiones.

Lo más importante para desarrollar una revisión sistemática es determinar su enfoque, para posteriormente llevar a cabo los siguientes pasos (Cochrane, 2012):

1. *Formular pregunta PICO*. Especificar los tipos de Población, los tipos de Intervenciones, las Comparaciones y los tipos de Outcome (desenlace) que son de interés
2. *Planificar criterios de elegibilidad*. Los criterios de elegibilidad son una combinación de los aspectos de las preguntas, además de la especificación de los tipos de diseño de estudio.
3. *Planificar la metodología*. Considerar desde el principio qué diseños de estudio pueden aportar datos fiables con los cuales se orientarán los objetivos de la revisión.
4. *Buscar artículos*. Se requiere una búsqueda amplia, objetiva y reproducible de una gama de fuentes, para identificar tantos estudios relacionados como sea posible (dentro del límite de los recursos).
5. *Selección de los estudios y obtención de datos*. Vincular múltiples informes de un mismo estudio; y el otro es utilizar la información disponible de los diferentes informes para determinar qué estudios son elegibles para su inclusión
6. *Evaluación del riesgo y sesgo de los artículos*. La evaluación de la validez de los estudios incluidos es un componente fundamental de una revisión y debería influir en el análisis, la interpretación y las conclusiones de la revisión.
7. *Generar el reporte correspondiente*. Con la información ya seleccionada, analizada e interpretada, generar el escrito con dichos resultados y conclusiones.

Estos pasos mencionados ayudan a tomar decisiones bien fundamentadas preparando, manteniendo y promocionando el acceso a las revisiones sistemáticas basadas en la recopilación de

datos importantes. También, aporta una síntesis fiable y eficaz de dicha averiguación disponible sobre un tema determinado, esto se apega al criterio de que la ciencia es acumulativa, y que facilita las decisiones al tener en cuenta toda la evidencia que resulta de un tema en específico.

2.2 Tecnologías

Las tecnologías son el instrumento que permite la ejecución de operaciones de forma eficaz y eficiente, ya que ayuda a optimizar, reducir o eliminar las imposiciones de la flexibilidad en los procesos (F, A. 2015). El término tecnologías inteligentes son aquellas que, mediante procesos automatizados, estudian y toman decisiones a partir de datos recopilados, teniendo como objetivo final realizar los procesos por la vía más eficaz y eficiente. (Llamas, 2021).

David R. Sjödin, et al (2018), exponen los avances más significativos obtenidos en torno al desarrollo e implementación de tecnologías, por medio de una revisión sistemática, la cual dio como resultado la identificación de los tópicos más relevantes para el funcionamiento sostenible de una ciudad, entre los cuales se encuentran la necesidad de contar con agua potable para el consumo de la población, energía eléctrica constante y económicamente asequible, así como la eficiente disposición, tratamiento y transformación de los residuos. Cada uno de los tópicos desarrollados en esta revisión sistemática se abordaron debido a su impacto en el funcionamiento de aquellas ciudades interesadas en lograr un desarrollo sostenible a través del avance de su infraestructura, el mejoramiento de la calidad de vida de sus ciudadanos y el uso eficaz de los recursos medioambientales.

2.3 Industria 4.0

Es la introducción de tecnologías como: computación en la nube, inteligencia artificial, internet de las cosas, robótica, entre otras, para que sean aplicadas a los procesos industriales en cuanto a su automatización y conexión de toda la línea de fabricación. La industria 4.0 trae un avance sin precedentes en la relación hombre vs máquina, tratándose de un esfuerzo para que las máquinas trabajen sin interferencia humana. Dando como resultado, empresas más eficientes, con procesos optimizados tanto en costo como en tiempo, además de reducción de desperdicios y errores (Sylde, 2022).

Haiyan Duan, et al (2010), mencionan que el rápido desarrollo y amplio uso de la tecnología de procesamiento de la información es la forma más importante de competir en el mundo hoy en día, ya que en su trabajo se menciona que un sistema inteligente completo no solo incluye automatización, sino también en red y tecnologías de la información.

3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DEL USO DE LAS TECNOLOGÍAS INTELIGENTES EN LA INDUSTRIA

Una revisión sistemática es una búsqueda detallada y exhaustiva de información, la cual responde a una pregunta de investigación sobre un tema en específico. Para el desarrollo de la misma se usan metodologías para plantear y responder lo que se desea saber, evidenciando de manera concreta los hallazgos del tema especificado. Dicho esto, en esta sección se presenta el análisis del estado del arte de algunas revisiones sistemáticas que abordan temas relacionados con las tecnologías inteligentes.

En Zengin, et al (2021), mencionan si los objetivos determinados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible crearon un sentido de orientación e influencia hacia la Industria 4.0 y la Sociedad 5.0 en Turquía. Aplicando una encuesta de 30 preguntas en las cuales el resultado de esto es que los Objetivos determinados 3–8 y 16 no tuvieron impacto significativo, por lo tanto, se dice que Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Infraestructura influyen en la percepción de que Turquía debe practicar Sociedad 5.0 e Industria 4.0.

Marco Ardolino, et al (2021). Llevan a cabo una revisión sistemática de la literatura en la que mencionan las aplicaciones de las tecnologías de la Industria 4.0 en el contexto de fabricación, mencionando que se ha acogido el análisis bibliométrico sistemático para revisar el progreso académico sobre el tema de Industria 4.0 y resumir las áreas de investigación así como los campos de aplicación, incorporando aspectos sostenibles en la integración máquina a máquina y de persona a máquina habilitada por las tecnologías Industria 4.0, además resumen el uso de la fabricación aditiva, Internet de las cosas, realidad virtual y realidad aumentada en el ámbito de la refabricación, por ejemplo, se menciona el tema del desarrollo de productos inteligentes para crear productos de detección, inteligentes y sostenibles, el desarrollo de una Red Inteligente Orientada a Servicios, en la que el Internet de las Cosas se utiliza para conectar a todos los usuarios implicados en la fase de diseño de la formalización del modelo de información del producto y se destaca la capacidad del Internet de las Cosas y el Análisis *Big Data* para mejorar el diseño de productos desde una perspectiva de economía circular.

R. Cioffi, et al (2020), llevaron a cabo una revisión sistemática sobre sistemas de fabricación inteligentes y tecnologías industriales aplicadas para una industria sostenible donde un total de 31 artículos fueron incluidos en este estudio para categorizar la literatura reciente y analizar el estado del arte, cuyos resultados arrojaron que a menudo se proponen modelos de madurez y preparación para evaluar la adopción de tecnologías digitales en las industrias. Estos modelos son herramientas potencialmente muy útiles ya que podrían ayudar a obtener una evaluación de las fortalezas y debilidades en la gestión de una empresa con vistas a la Industria 4.0.

Hui Yang, et al (2019), presentan una revisión de las tecnologías y sistemas del Internet de las Cosas siendo estos los motores y

fundamentos de las innovaciones establecidas en datos para la fabricación inteligente. Dando como resultado, que las tecnologías de sensores avanzados se utilizan ampliamente en la fabricación para aumentar la visibilidad de la información y la capacidad de control del sistema. Teniendo en cuenta que, aunque los sensores, datos y Tecnologías de la Información ya estén disponibles en las fábricas físicas, no están estrechamente integrados hasta el nivel de Internet de las Cosas.

Yesheng Cui, et al (2019), presentan una revisión sistemática de la literatura sobre el estado del arte de *big data* en la fabricación, donde su objetivo es categorizar tipos similares de herramientas de big data e identificar las diferencias como preparación para lograr dicho propósito. Dando como resultado en el análisis de los artículos que clasifican en cuatro categorías: Producto, Producción, Negocio y Tecnología de la Información y Comunicación. se dice que las tres primeras categorías se centran en funciones de ingeniería y negocios, la arquitectura de las Tecnologías de la Información y Comunicación sustenta las tres dimensiones para dotar de infraestructura de las Tecnologías de la Información y Comunicación y la digitalización de la fabricación, que incluye varios temas: fabricación en la nube, Tecnologías de la Información y Comunicación, análisis de datos/gestión de datos.

Morteza Ghobakhloo (2020), lleva a cabo una revisión de la literatura basada en el estado del arte y el contenido actual de la aplicación de las tecnologías modernas en apoyo a la fabricación inteligente, a través del cual los fabricantes pueden garantizar el éxito de la aplicación de estas tecnologías e implementar una metodología de modelado estructural interpretativo. En el estudio se identificaron once factores facilitadores y el mapeo de las interrelaciones contextuales entre ellos. También se explica las complejas relaciones de precedencia que existen entre los determinantes de la adopción de Tecnologías de la Información y Digital de fabricación inteligente. Este documento tiene como objetivo principal, identificar los determinantes de la adopción de las Tecnologías de la Información y Digital de fabricación inteligente y mapear aún más las relaciones de precedencia entre ellos. Se obtienen 11 determinantes: 1) Beneficios percibidos 2) Disponibilidad de recursos financieros 3) Apoyo a la gestión 4) Madurez de la tecnología de operaciones 5) Madurez en la digitalización 6) Apertura al cambio 7) Cualificación de los trabajadores 8) Capacidad de integración perfecta 9) Política de responsabilidad social de las empresas 10) Hoja de ruta estratégica para la digitalización 11) Madurez en ciberseguridad, se logra aplicando la propiedad de transitividad en base a las relaciones previamente establecidas.

Sameer Mittal, et al (2018), llevan a cabo una revisión sistemática, la cual investiga los rasgos que son característicos de las pequeñas y medianas empresas identificando las brechas y apoyar con éxito en su progreso hacia la Industria 4.0. Aquí el objetivo principal es revisar críticamente la Fabricación Inteligente y la Industria 4.0 actualmente disponible en modelos de madurez, y analizar su ajuste reconociendo los requerimientos

específicos de las Pequeñas y Medianas Empresas, por lo tanto los hallazgos de dicha investigación son que 1) un modelo de madurez para las pymes debe tener un "nivel 0" claramente definido, por ejemplo, la informatización de los procesos comerciales centrales y la conectividad en el taller, que puede explicar mejor el estado de muchas Pequeñas y Medianas Empresas con respecto a su momento digital actual y sus capacidades de automatización 2) La transición del "nivel 0" al "nivel 1" puede incluir un cambio drástico en la cultura organizativa de una empresa (en este caso una pequeña y mediana empresa) ya que implica la adopción de nuevas tecnologías, cultura organizacional y habilidades de aprendizaje, etc. 3) Es esencial que una empresa considere tanto el estado

actual de su organización como el avance hacia su visión y su nivel de adaptación a la Fabricación Inteligente/Industria 4.0, con la ayuda de una herramienta de autoevaluación que puede ser utilizada por un gestor de Pequeñas y Medianas Empresas en varias etapas de su viaje hacia la Fabricación Inteligente / Industria 4.0.

3.1 Conclusiones del estado del arte

Este apartado muestra algunos puntos importantes a manera de tabla (*Ver tabla 1*) sobre las comparativas de las revisiones analizadas.

Tabla 1. Comparativa de las revisiones sistemáticas analizadas

Título	Bases de datos	Periodo de búsqueda	Cadena de búsqueda	Tecnologías halladas
Una investigación sobre la Industria 4.0 y Sociedad 5.0 en el contexto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (Zengin, Naktiyok, Kaygı, Kavak, & Topçuoğlu, 2021).	MDPI, Google académico, Elsevier, Springer Link, Ana sayfa Educación y ciencia, emerald insight	2011-2021	Sociedad 5.0; sociedad súper inteligente; ODS; Industria 4.0; Sociedad digitalizada	Inteligencia artificial, sistemas cibernéticos, internet de las cosas, realidad aumentada y la nube
Las aplicaciones de las tecnologías de la Industria 4.0 en el contexto de fabricación (Ardolino, Bacchetti, & Perona, 2021)	Scopus, Web of Science, Springer Link, Elsevier, Google académico, Taylor and Francis Online, Web of Science, emerald insight, MDPI, Crossref	2010-2020	Industria 4.0; sistemas de fabricación; Tecnología de fabricación avanzada; procesos de manufactura; fabricación inteligente; revisión de literatura	Internet de las cosas, Big Data análisis en la nube
Sistemas de Manufactura Inteligente y Tecnologías Industriales Aplicadas para una Industria Sostenible (Cioffi, Travaglioni, Piscitelli, Petrillo, & A. Parmentola, 2020)	Google académico, Elsevier, Springer Link, emerald insight, Feeding the minds that feed the world, Emprendimiento y Sostenibilidad, PubMed, IopScience, Wiley Online Library, Sage Journals, MDPI,	1985-2020	Sistema de fabricación inteligente; tecnologías industriales aplicadas; economía circular; fabricación sostenible; política industrial; revisión sistemática de la literatura.	Inteligencia artificial, fabricación aditiva y sistemas ciberfísicos
Ecosistema de big data de fabricación (Yang, Kumara, Bukkapatnam, & Tsung, 2019).	IEEE Explore, Harvard Bussines Review, ACM Digital Library, Science Direct, Kaunas University of thechnology, Taylor and Francis Online	2013-2018	Fabricación inteligente, Big data, Computación en la nube, Fabricación en la nube, Internet de las cosas	Fabricación en la nube, Tecnologías de la Información y Comunicación, análisis de datos
El internet de las cosas para la fabricación (Cui, Kara, & Chan, 2019)	Asme digital collection, Google académico, Elsevier, Springer Link, Web of Science, Scientific Research, IEEE Explore, Scirentific Reports, Taylor and Francis Online	2003-2018	Internet de fabricación de cosas (IoMT), Red de máquinas virtuales, Sistemas de sensores, Fabricación inteligente, Ciberseguridad, Ciencia de redes, Políticas de fabricación oportunidad de safiar.	Sensores, datos y Tecnologías de la Información, Internet de las cosas
Determinantes de la implementación de la tecnología digital y de la información para la fabricación inteligente (Ghobakhloo, 2020)	Elsevier, Emerald, IEEE Xplore, SAGE Publications, John Wiley & Sons, Springer, and Taylor & Francis, IBM Business	2002-2017	Industria 4.0; fabricación inteligente; digitalización de la fabricación; internet industrial	Tecnologías de la Información y Digital
Modelos de madurez de fabricación inteligente e Industria 4.0 (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018)	Google académico, Elsevier, Web of Science	2001-2018	Fabricación inteligente, Industria 4.0, Fábrica inteligente, hojas de ruta, Modelos de madurez, Marcos Evaluaciones de preparación Pequeñas y medianas empresas Pymes	Modelos de madurez, tecnologías de la información, internet de las cosas, computación en la nube

Elaboración propia

La tabla muestra de manera resumida, algunos puntos que fueron analizados de cada revisión iniciando con la columna de título, para identificar que son acordes al tema. La segunda columna menciona las bases de datos, para saber que tan confiable es la extracción de la información que presentan. La tercera columna muestra el periodo de búsqueda, que permite saber la ventana de tiempo en la que se ha venido investigando y documentando este tema. La cuarta columna presenta la cadena de búsqueda, para conocer los términos utilizados que permitieron adquirir la información del tema. Finalmente, la quinta columna muestra las tecnologías halladas, que como se puede observar, están estudiadas en un tiempo largo las cuales han venido a ser tendencia común entre las revisiones analizadas.

4. ANÁLISIS DE LAS REVISIONES SISTEMÁTICAS

En esta sección se presenta el análisis de las revisiones y su relación. No obstante, cada una de las revisiones analizadas llevaron a cabo el mismo protocolo de investigación para la obtención de datos (ver 2.1).

Los artículos (Ardolino, Bacchetti, & Perona, 2021), (Yang, Kumara, Bukkapatnam, & Tsung, 2019), (Cui, Kara, & Chan, 2019), (Ghobakhloo, 2020), mencionan las tecnologías facilitadoras más comunes y utilizadas en las industrias son: Internet de las Cosas, *Big Data*, Tecnologías Digitales inteligentes, la inteligencia artificial, Red Inteligente Orientada a Servicios, Tecnologías de la comunicación.

Algunos artículos muestran una tendencia a llevar a cabo modelos de madurez para medir el nivel de la industria y esto les permita saber cómo están actualmente y si les sería viable la transición a ser una industria digital (Ghobakhloo, 2020), (Sjödin, Parida, Leksell, & Petrovic, 2018), (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018).

El compromiso que tienen todos los gerentes, es proporcionar los recursos necesarios, de arriba abajo adaptando nuevos modelos de aprendizajes fundados en el conocimiento, y contribuir al progreso de redes colaborativas con socios siendo esto indispensable para el éxito de la transformación que requiere la industria para la fabricación inteligente. Teniendo en cuenta que el cambio a digitalización es un pilar de la gestión estratégica del cambio interorganizacional e intraorganizacional (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018).

Se necesita tener claro qué es lo que requiere la industria y si es capaz de adaptarse a un cambio tan intenso como lo es la digitalización de la misma, ya que esto estaría obligando a los fabricantes contemporáneos a evolucionar y cambiar mediante la exclusión de prácticas y estructuras burocráticas, al tiempo que admiten paradigmas y diseños de aprendizaje basados en el conocimiento, que son dinámicos y colaborativos (Cui, Kara, & Chan, 2019), (Sjödin, Parida, Leksell, & Petrovic, 2018).

El cambio no solo va a desafiar la capacidad de los fabricantes para innovar, sino que también pretende la implementación de nuevas estrategias y modelos organizativos, así como una

desarrollada organización de cambios en la infraestructura física, las operaciones y tecnologías de fabricación, los recursos humanos y la gestión de prácticas (Sjödin, Parida, Leksell, & Petrovic, 2018), (Sylde, 2022), (Ardolino, Bacchetti, & Perona, 2021).

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Desde hace tiempo atrás el impacto de la fabricación ha sido negativo ya que las industrias causan daños al planeta, debido al derroche indiscriminado de recursos, los monocultivos y el uso excesivo de sustancias tóxicas para el ambiente.

Pues hoy en día nos encontramos en una situación muy crítica en cuanto a la transformación de materia prima en productos terminados, ya que la población tiene un crecimiento impresionante día a día y la demanda de los productos es cada vez mayor, entonces esto afecta al ámbito ambiental, social y empresarial siendo primordial en este caso impulsar la transición hacia un nuevo modelo productivo que reduzca la presión sobre el medio ambiente, y que será competente para generar desarrollo económico y social.

Por lo tanto, en un futuro se realizará una Revisión Sistemática, llevando a cabo el protocolo científico de investigación mencionado en la sección 2 (ver 2.1) para poder resumir las cuestiones del uso de las tecnologías inteligentes en los procesos de una industria y así poder ampliar más el tema para aportar información importante de las tecnologías en tendencia, ya que alguna literatura menciona que aún hay brechas de información, en tema de la industria 4.0 pues por ser un término reciente aún no se abarca a profundidad, y basado en la literatura no se sabe aún si se utilizan de manera adecuada o no las tecnologías.

REFERENCIAS

- Ardolino, M., Bacchetti, A., & Perona, M. (2021). Las aplicaciones de las tecnologías de la Industria 4.0 en el contexto de fabricación: una revisión sistemática de la literatura. *Revista internacional de investigación de producción*, 34.
- Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., & A. Parmentola. (2020). Sistemas de Manufactura Inteligente y Tecnologías Industriales Aplicadas para una Industria Sostenible: Una Revisión Sistemática de la Literatura. *Ciencias Aplicadas*, 22.
- Cochrane. (2012). Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones. En Cochrane, *Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones* (pág. 272). Barcelona: Versión 5.1.0.
- Cui, Y., Kara, S., & Chan, K. C. (2019). Ecosistema de big data de fabricación: una revisión sistemática de la literatura. *Robótica y fabricación integrada por computadora*, 20.

- Duan, H., Bai, B., & Wang, Y. (2010). La aplicación de la tecnología de control inteligente en el diseño creativo de muebles. *Ingeniería Industrial y de Control*, 4.
- F, A. (2015). *Implementación de nuevas tecnologías*. Primera edición : 308.
- Ghobakhloo, M. (2020). Determinantes de la implementación de la tecnología digital y de la información para la fabricación inteligente. *Revista internacional de investigación de producción*, 23.
- Llamas, J. (2021). *Tecnología inteligente*. Mexico: <https://economipedia.com/definiciones/tecnologia-inteligente.html>.
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). Una revisión crítica de los modelos de madurez de fabricación inteligente e Industria 4.0: implicaciones para las pequeñas y medianas empresas (PYME). *Diario del Sistema de Manufactura*, 21.
- R, D., Parida, V., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Implementación de fábrica inteligente e innovación de procesos. *gestión de tecnología de investigación*, 11.
- S, B., & L, R. (2020). Innovación y Tecnologías Inteligentes. *Foro Económico de Galicia*, 23.
- Sjödin, D. R., Parida, V., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Implementación de fábrica inteligente e innovación de procesos,. *Gestión de Tecnologías*, 11.
- Sylde. (17 de Enero de 2022). Tecnologías de la Industria 4.0: ¿Qué son y cómo funcionan? *Sylde*, pág. 4.
- Yang, H., Kumara, S., Bukkapatnam, S. T., & Tsung, F. (2019). El internet de las cosas para la fabricación inteligente: una revisión. *Transacciones IISE*, 36.
- Zengin, Y., Naktiyok, S., Kaygın, E., Kavak, O., & Topçuoğlu, E. (2021). E.Una investigación sobre la Industria 4.0y Sociedad 5.0 en el contexto de Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Sostenibilidad*, 16.

Aplicación de la mecánica de fluidos en el diseño de un sistema hidropónico

F.A. Martínez Marín*, G. Garciabada Silva*, I.A. Cantú Munguía* y A. A Hernández Cervantes*

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad académica de Puerto Vallarta,*

Departamento de Electromecánica

Puerto Vallarta, Jalisco, México (Tel: 322-2265600; e-mails: aldo.hernandez@vallarta.tecmm.edu.mx, gabriel.garciabada@vallarta.tecmm.edu.mx, francisco.martinez@vallarta.tecmm.edu.mx, irma.cantu@vallarta.tecmm.edu.mx)

Resumen: Tomando como referencia que la hidroponía es un sistema de cultivo que permite el crecimiento de plantas en una solución líquida enriquecida con nutrientes, los cuales son provistos a través de un flujo constante proporcionado por un sistema de riego, donde la principal característica del sistema es prescindir de tierra al optimizar los espacios necesarios para el cultivo.

El presente trabajo tiene como finalidad mostrar los cálculos necesarios de las velocidades de flujo del agua enriquecida en nutrientes utilizada en un cultivo hidropónico. Para ello se hizo uso de la técnica de lámina nutritiva (NTF por sus siglas en inglés). Con esta técnica se debió de integrar una delgada lámina de solución nutritiva de aproximadamente un centímetro que circule por un tubo con perforaciones en su parte superior de tal magnitud que las plantas puedan ser insertadas.

Palabras Clave— mecánica de fluidos, lámina nutritiva, sección transversal, velocidad, caudal

1. INTRODUCCION

Los sistemas hidropónicos son un tipo de cultivos basados en mantener las raíces de las plantas mojadas a través de un fluido rico en nutrientes, permitiendo el crecimiento del producto y evitando el uso de un cultivo tradicional a base de tierra. Este tipo de sistemas son cada vez más utilizados ya no solo por profesionales sino por aficionados en jardines urbanos y cultivos en el interior de una vivienda. De tal forma es necesario determinar las correctas velocidades del fluido de nutrientes para la posterior selección de una bomba hidráulica correcta.

Los nutrientes requeridos en el cultivo hidropónico se aportan constantemente mediante el agua de riego que se encuentra en constante circulación. Este aporte constante de nutrientes permite una disponibilidad total en búsqueda de los mejores resultados en cuanto a tiempo de cultivo y producción.

Es importante mencionar que en este tipo de cultivos es imprescindible un correcto nivel de pH y CE (conductividad eléctrica) en el agua de riego. Un desajuste en el pH impediría la correcta absorción de ciertos nutrientes dando lugar a carencias de desarrollo. En el caso de una CE demasiado baja también daría como resultado carencias en los nutrientes más importantes (nitrógeno, fósforo y potasio), mientras, una EC demasiado alta podría sobre fertilizar las plantas, paralizando completamente su desarrollo.

Las ventajas de los sistemas hidropónicos son los siguientes

- Menor espacio
- Mayor rapidez de cultivo
- Mayor producción
- Menos plagas
- Cultivo más limpio
- Económicos
- Respeto por el medio ambiente
- Respetuosa con el medio ambiente
- Mínima cantidad de agua

Durante las últimas décadas los avances técnicos en el sector agrícola han ido en aumento, así como el uso de los cultivos hidropónicos en la agricultura intensiva. No solo por el auge en la protección de los cultivos si no por el avance de las técnicas de producción como:

- Desarrollo de riego localizado
- Programadores para el control del riego
- Ordenadores para el manejo de cultivos
- Desarrollo de sustratos

Por otro lado, en un sistema hidropónico se tiene que el sistema de riego es de suma importancia y por ello la mecánica de fluidos tiene su rol definido en estos sistemas. Es decir, al identificar que la mecánica de fluidos radica en la transportación o movimiento de un fluido, el presente caso de estudio utiliza una solución líquida rica en nutrientes como fluido para alimentar al

cultivo hidropónico. En consecuencia, es necesario mencionar el aporte de la mecánica de fluidos en el sistema de riego, ya que nos permite seleccionar las velocidades de la solución con nutrientes requeridas para los diferentes cultivos.

1.1 Sistemas hidropónicos

Hay diferentes sistemas de hidroponía en el mercado como:

Sistema DWC (Deep Water Culture). Se basa en sumergir las raíces de las plantas en un depósito de agua con nutrientes a la que se instala una bomba de aire para mantener la solución nutritiva oxigenada

Sistemas EBB. También llamados por Inundación. Se componen de 2 depósitos. Uno en el que estarán instaladas las plantas y que se inundará cada cierto tiempo con el agua que contiene la solución de nutrientes. El otro depósito será el que contendrá el agua una vez se vacíe el primer depósito. Su funcionamiento permite que mediante una bomba de agua conectada a un temporizador se inundará el depósito superior durante unos minutos para que las plantas puedan absorber agua y nutrientes.

Sistema NFT por sus siglas en ingles Nutrient Film Technique utiliza un sistema de canales en los que se hace circular el agua. Estos canales tienen aberturas donde se colocan las plantas y en los que sus raíces están en contacto con la solución de nutrientes que recorre estos canales. Estos sistemas son muy económicos y sencillos de instalar, tan solo se necesitan los tubos o canales y una bomba de agua. Son utilizados principalmente en grandes cultivos de hortalizas como la lechuga en los que se busca la mayor producción optimizando al máximo el espacio de cultivo.

Sistemas hidropónicos por goteo. Conocidos como Drip System o riego por goteo este sistema de hidroponía va regando las plantas gota a gota. Para ello se suelen utilizar aros con microgoteros conectados a una bomba de agua que recogerá el agua con nutrientes de un depósito inferior. La planta se sujeta en una maceta llena normalmente de sustrato inerte que no retenga la humedad ni ningún tipo de nutriente. Las raíces se expandirán a través de este sustrato consiguiendo una buena sujeción.

1.2 Sistemas de riego

Existen diferentes tipos de sistemas de riego los cuales son:

Riego por superficie. La energía que distribuye el agua por la parcela es la derivada de su propio peso circulando libremente por el terreno a favor de pendiente. Con este método de riego se suele mojar la totalidad del terreno y requiere el reparto del agua mediante surcos para controlar su distribución. En el caso de un cultivo hidropónico este riego de superficie o superficial ocurre

a través de tuberías y el efecto de la gravedad, permite mojar las raíces del producto.

Riego por aspersión. El agua es conducida a presión, al llegar a los emisores (aspersores) produce gotas que mojan todo el terreno de forma similar a como lo haría la lluvia.

Riego localizado. Se moja sólo la parte del suelo próxima a las plantas. El agua a baja presión llega mediante tuberías hasta las plantas.

Riego por goteo. Este método de riego consiste en llevar el agua directamente a las raíces a través de tuberías y goteros permitiendo la utilización óptima de fertilizantes.

Riego por subirrigación. Consiste en inundar una estructura almacenadora hasta alcanzar el nivel requerido para la distribución de agua. Una vez alcanzado el nivel, el agua asciende por medio de la acción capilar.

1.3 Solución de nutrientes

La solución de nutrientes se obtiene al mezclar agua con una cantidad de minerales añadidos a través de fertilizantes en cantidades y proporciones adecuadas, para cubrir las necesidades de las plantas en su crecimiento y desarrollo (Inca, 2013). Una solución de nutrientes se compone de agua con oxígeno y de todos los nutrimentos esenciales en forma iónica y algunos compuestos orgánicos. La tabla 1 muestra una relación de elementos químicos y compuestos importantes para una solución nutritiva.

Tabla 1 Componentes de la solución de nutrientes

Elemento	Compuesto
Nitrógeno, fosforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y los micronutrientes: boro, cloro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc y níquel.	Nitrato de amonio, superfosfato triple de calcio, nitrato de potasio, Sulfato de magnesio, Quelato de fierro, Sulfato de cobre, sulfato de Zinc, sulfato de manganeso, Ácido bórico, sulfato de potasio y nitrato de calcio.

Es importante señalar que en una solución de nutrientes los parámetros usados en controlar la calidad de la solución nutritiva son los siguientes:

- Alcalinidad o Acidez de la Solución nutritiva (pH)
- Conductividad Eléctrica (CE)
- Oxígeno Disuelto
- Temperatura

Además, estos parámetros deben manejar un rango de operación de tal manera que el cultivo este en óptimas condiciones. El pH (potencial de Hidrógeno) debe mantener un rango en 5.5 y 6.5.

La conductividad eléctrica al ser una variable de la solución nutritiva, la solución debe manejar distintos valores que oscilan entre 1400 a 2000 ppm (parte por millón). La temperatura que normalmente se manejan en un sistema hidropónico es una temperatura ambiente de 22 grados centígrados, siendo en el caso de estudio en este artículo una temperatura que oscila entre 23 y 32 grados centígrados. Por último, el Oxígeno disuelto se mantiene gracias a la recirculación periódica de la solución nutritiva.

2. DISEÑO DEL SISTEMA HIDROPÓNICO

Tradicionalmente la irrigación en un sistema hidropónico puede llegar a contener altas cantidades de fertilizantes y productos químicos, los cuales, originan un uso inadecuado del agua; inclusive afectaría los mantos acuíferos. Una alternativa practica para reducir las desventajas del sistema de riego convencional abiertos, es utilizar un sistema de riego recirculatorio.

Dicho sistema de riego recirculatorio tiene la finalidad de utilizar un depósito de solución líquida nutritiva, donde esta sustancia debe ser llevada a lo largo del cultivo hidropónico y posteriormente ser recolectada en el depósito para volver a ser utilizada. En el presente trabajo, la realización del diseño y futura construcción del sistema toma como base tubería PVC sanitaria de 4" y 2" que formaran la estructura y sistema de circulación del agua con nutrientes.



Figura 1 esquema de propuesta

La tubería que se utiliza en la etapa de cultivo es de 4", siendo esta, donde se formara la lámina nutritiva y la reducción campana de 4" a 2" pulgadas determina las dimensiones de la lámina nutritiva. La tubería de 2" formara

la estructura para el soporte de la tubería de 4", como se muestra en la figura 3.

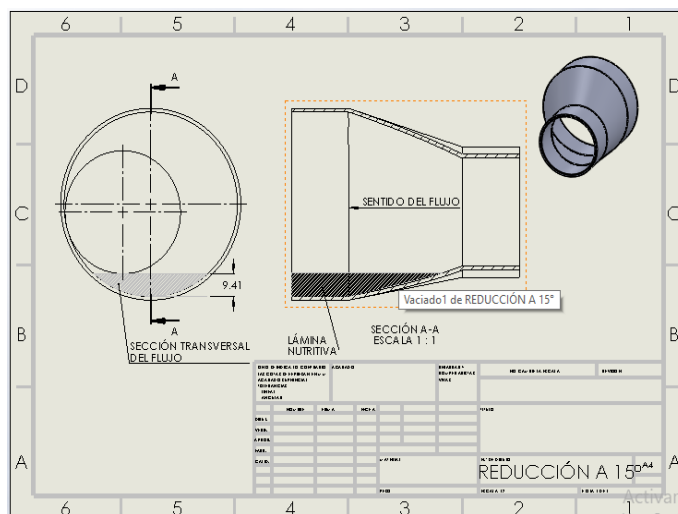


Figura 2 Formación de lámina nutritiva

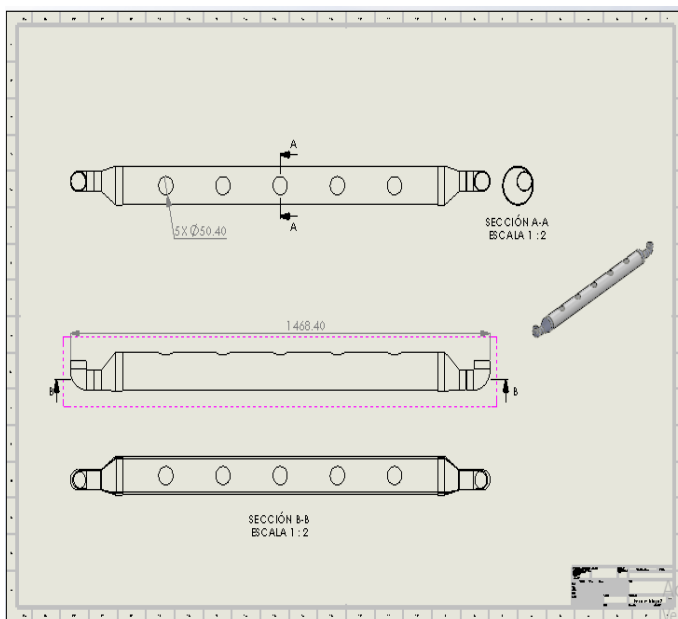


Figura 3 Tubería de cultivo

Una vez dimensionados los componentes del sistema se toma un modelo tridimensional para comprobar medidas, formas y posiciones de las piezas que lo constituyen, obteniendo lo que se muestra en la figura 4.

Con el resultado obtenido en el modelado esquemático de la figura 4, se construye un prototipo, que se muestra en la figura 5, que nos permite la realización de pruebas de su funcionalidad.

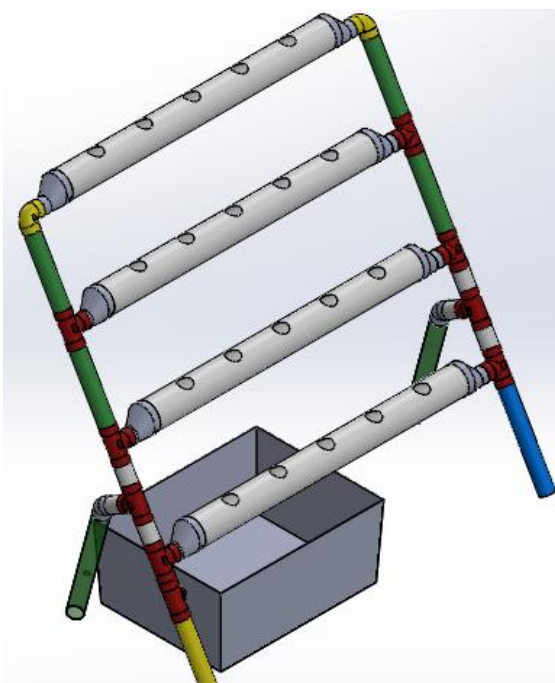


Figura 4 Modelo de sistema hidropónico



Figura 5 Prototipo del sistema hidropónico

Para que este sistema de cultivo hidropónico reciba los nutrientes requeridos y permitir el crecimiento de las plantas, se debe circular la sustancia con dichos nutrientes, por tal motivo uno de los sistemas para este tipo de cultivo es el sistema NFT, el cual se ha seleccionado para el presente proyecto.

En esta técnica se debe de formar una delgada lámina de solución nutritiva (de 0,5 a 1,0 cm) que circula por un tubo con perforaciones en su parte superior, en las cuales se cultivan las plantas. El movimiento de la solución nutritiva dentro de los tubos, y hacia el tanque de fertilización, se produce por gravedad gracias a la inclinación de los tubos que debe de estar entre el 4 y 5 %. Para llevar la solución nutritiva desde el tanque hasta el inicio de los tubos se utiliza una bomba hidráulica y el caudal recomendado para la circulación de agua con nutrientes es de 1 a 4 litros/minuto, esto depende del cultivo que se vaya desarrollar.

Con esta información se procede al cálculo de las velocidades a las que debe de moverse el agua con nutrientes por la tubería para evitar, por un lado, el estancamiento de agua que provocaría la falta de oxigenación y la muerte de la raíz y por otro lado, el arrastre excesivo de las raíces.

Siendo el caudal necesario de 1 a 4 litros/minuto para los diferentes cultivos, se estiman las velocidades mínima, media y máxima. Para calcular las velocidades apropiadas se procede a despejar v (velocidad) de la fórmula del caudal volumétrico Q (m^3/s) (Sistema internacional), mismo que se determina a partir de la ecuación (1)

$$Q = Av \quad (1)$$

Dónde:

A = área de la sección transversal del flujo

v = velocidad del flujo

De esta ecuación se despeja la variable v (velocidad) y se obtiene la siguiente formula, Con la finalidad de determinar los datos necesarios se parte de la expresión 2.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

4. RESULTADOS

Para un caudal de 1 litro/minuto que convertido a m^3/s es:

$$Q = 1 \text{ l/min} = 0.0167 \text{ l/s} = 1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Área total del tubo de 4" (105.6 mm) de diámetro será:

$$A_t = \pi d^2/4 = \pi 105.62^2/4 = 8,758.28 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 0.00876 \text{ m}^2$$

De acuerdo al análisis realizado con el apoyo del software de diseño, se determina que para obtener la altura de la lámina nutritiva que aproxima a los 10 mm, se establece que el área de sección transversal del flujo representa el 12.35 % del área total de la tubería de 4", esto, representado y estimado de acuerdo a la figura 2, siendo:

Área del flujo de la lámina nutritiva

$$A_f = 0.00108 \text{ m}^2$$

La **velocidad mínima** será:

$$v = 1.67 \times 10^{-5} / 0.00108 = \mathbf{0.0154 \text{ m/s}}$$

Así mismo para un caudal de 4 litro/minuto que convertidos a m^3/s tenemos:

$$Q = 4 \text{ l/min} = 0.067 \text{ l/s} = 6.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

El área de sección transversal del flujo sigue siendo el 12.35 % del área transversal total disponible del tubo de 4":

$$A_f = 0.00108 \text{ m}^2$$

La **velocidad máxima** será:

$$v = 6.67 \times 10^{-5} / 0.00108 = \mathbf{0.062 \text{ m/s}}$$

Para un caudal promedio que es 2.5 litro/minuto convertido a m^3/s tenemos:

$$Q = 2.5 \text{ l/min} = 0.0467 \text{ l/s} = 4.167 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_f = 0.00108 \text{ m}^2$$

Donde la velocidad media será:

$$v = 4.167 \times 10^{-5} / 0.00108 = \mathbf{0.0386 \text{ m/s}}$$

Con este trabajo se lograron obtener los parámetros adecuados para llevar a cabo un diseño y construcción de prototipo apropiado para el cultivo hidropónico, donde se obtuvieron las velocidades requeridas para diferentes tipos de vegetales, mismas que sirvieron para determinar la bomba hidráulica sugerida. Aunado a esto, se conjuntaron diferentes disciplinas de la ingeniería abonando a la formación del estudiante en el manejo interdisciplinario de su conocimiento. Además, se da la pauta para la construcción del sistema a una escala en el desarrollo del mismo que podrá ser automatizado y sustentable a través de energía alternativa.

Dentro de uno de los principales objetivos que se tiene como humanidad, es la de buscar la sustentabilidad de los recursos que se tienen. Por ello el presente trabajo aborda un área de oportunidad como lo es el desarrollo de sistemas hidropónicos. Además de buscar la conjunción de diferentes disciplinas de la ingeniería con la finalidad de solventar una problemática en específico.

6. REFERENCIAS

- Alveal, M. A. (2014). *Estudio comparativo de sistemas de riego hidropónico y por goteo*. Chile: Universidad del Bío Bío.
- Bedoya, L., & Suarez, S. (2020). *Automatización de la técnica de hidroponía NFT en invernadero, con monitoreo web*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Bizuet, A. (2014). *Desarrollo e instrumentación virtual para un invernadero hidropónico de lechuga Simpson*. Ciudad de México: UNAM.
- Castro, E. (2020). *Diseño conceptual de un sistema de bajo costo, de riego por goteo para proyecto experimental de cultivo hidropónico en invernadero*. Bogota: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Cepeda-Guzman, A. (2014). Respuestas de lechuga a la conductividad eléctrica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícola*, 1233-1245.
- Cortés, A. (2015). *Diseño de un sistema para control y monitoreo de un invernadero hidropónico*. Ciudad de México: Instituto Politécnico nacional.
- Gálvez, G., & Yorch, R. (2020). *Diseño hidráulico de un sistema hidropónico para optimizar la eficiencia de los recursos hídricos en la agricultura del distrito de la Yarada Los Palos*. Tacna: Universidad Privada de Tacna.
- Inca, S. (2013). *Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos*. Lima: Universidad Ricardo Palma.

5. CONCLUSIONES

- Juarez-López, P., & Morales-Rodríguez, H. (2013). Producción de forraje verde hidropónico. *Nueva epoca*, 16-26.
- López, S., & Vera, J. (2022). Automatización del control de nutrientes en hidroponía mediante el uso de un sistema embebido. *Polo del conocimiento*, 814-826.
- Lubert, J. (2016). *Análisis, diseño y construcción de un sistema hidropónico automatizado para autoconsumo de vegetales y plantas ornamentales*. Santiago: Universidad de Chile.
- Quirós, D. (2011). *Diseño de un sistema hidropónico a mediana escala*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rojas, S. (2019). *Diseño de un sistema hidropónico orbital como alternativa de producción de alimento de alta intensidad en zonas urbanas*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Zúñiga-Estrada, L. (2004). Producción de chile pimiento en dos sistemas de riego bajo condiciones hidropónicas. *Agrociencias*, 207-218.

Propuesta de un biodigestor anaerobio para la elaboración de composta orgánica

L. Gómez-Muñoz, C. Morales-Morales, M. Castro-Bello, C.V. Marmolejo-Vega

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo

Resumen: La digestión anaeróbica es una de las principales tecnologías utilizadas para el aprovechamiento de Residuos Orgánicos (RO). Investigaciones recientes han revelado que los desechos de cocina RO como materia prima poseen un gran potencial en la producción de biogás y composta orgánica. Por esta razón se presenta la propuesta de diseño de un prototipo de biodigestor anaerobio que permita conocer y controlar factores como temperatura y PH así mismo evaluar el tiempo de retención hidráulica (TRH). Lo anterior se hace con el uso de sensores conectados a una tarjeta de adquisición de datos que será controlada usando una computadora.

Palabras Clave: Composta orgánica, Biodigestor. Instrumentación, Residuos orgánicos.

INTRODUCCION

La gestión de los residuos orgánicos es un problema universal que afecta a cada persona en el mundo. En México, más del 50 por ciento de los residuos son orgánicos, gran parte de ellos son originados por el desperdicio de alimentos, estos finalmente terminan siendo depositados en los vertederos municipales sin ningún tipo de tratamiento, lo cual genera graves problemas ambientales (Kaza et al., 2018). Respecto a lo anterior, es fundamental brindar apoyo en la toma de decisiones cruciales relacionadas con la política de gestión de residuos sólidos y su planificación; La reducción del desperdicio de alimentos a través del uso de tecnologías sustentables, así como el aprovechamiento de los residuos orgánicos (Flores-Nieves et al., 2022).

Los desechos orgánicos domésticos representan uno de los grandes potenciales para alimentar a biodigestores anaeróbicos para producir composta orgánica. Estos son contenedores cerrados herméticamente (Mutungwazi et al., 2018) y que funcionan bajo el proceso biológico de la Digestión Anaeróbica (DA), que ocurre en ausencia de oxígeno (Ajay et al., 2021). El resultado de este proceso son dos productos principales: Biogás y composta orgánica (Jyothilakshmi & Prakash, 2016). Cabe resaltar que este tratamiento se ve influenciado por diferentes factores tales como: temperatura, PH, Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), inóculo y sustrato. Las cuales requieren de un control definido para que los microorganismos involucrados no se vean afectados. (Granzotto et al., 2021).

Ahora bien, los desechos de alimentos, tanto antes como después del consumo, son un material orgánico de alta calidad para la producción de biogás porque la composición molecular es biológicamente compatible con las comunidades microbianas que facilitan la DA (Miller et al., 2020).

Respecto a la utilización de residuos de alimentos como materia prima en el biodigestor (Granzotto et al., 2021) propone el uso de un biodigestor para el tratamiento de residuos de un restaurante universitario. (Jyothilakshmi & Prakash, 2016) plantea el uso de un Biodigestor Anaerobio de pequeña escala para el aprovechamiento de residuos sólidos

biodegradables domésticos, mientras que (Zhang et al., 2017) desarrolla un novedoso digestor anaeróbico compacto de tres etapas para la digestión anaeróbica de alta eficiencia de los desechos de alimentos y la producción de metano.

La investigación presentada en este artículo cortó está centrada en el diseño de un prototipo de una tecnología biodigestora instrumentada que optimiza los recursos naturales y acorta el tiempo de digestión anaerobia.

PROBLEMA

La actividad agrícola enfrenta grandes desafíos tecnológicos de innovación, principalmente con el aprovechamiento de los residuos orgánicos naturales. Este tema es preocupante debido a que para el año 2050 se superará los 9,000 millones de personas y conllevará en un aumento de la demanda de productos agrícolas (FAO, 2022). El tema del diseño de biodigestores ha sido un tema ampliamente estudiado, sin embargo, las tecnologías actuales presentan algunas desventajas, como aireación manual, pérdida de oxígeno, falta de control de PH, temperatura, entre otras variables. Además, la materia prima que alimenta al biodigestor es selecta, lo cual limita el material orgánico que contiene los nutrientes disponibles para las plantas y organismos que contribuyen con la calidad del suelo.

MOTIVACION

La digestión anaeróbica ha ganado una amplia aceptación para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, junto con la producción de biogás y la recuperación de nutrientes orgánicos (Karki et al., 2021). Por tal motivo se busca manipular el proceso de DA para aumentar la conversión de materia orgánica a través del diseño y la instrumentación del biodigestor. Sin embargo, todos los cambios deberán contribuir a generar el equilibrio de los factores con el fin de no afectar a la población microbiana (Miller et al., 2020)

OBJETIVO GENERAL

Proponer un diseño de un biodigestor anaerobio para la elaboración de composta orgánica a través del uso de residuos domésticos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Revisar bibliografía para la asimilación de información de biodigestores.
- Identificar tipos de biodigestores portátiles.
- Proponer un diseño de biodigestor.

PROPUESTA DE SOLUCION

La contribución del trabajo de tesis consiste en proponer un diseño de biodigestor anaerobio para la producción de abono orgánico, considerando la optimización de la materia prima orgánica y reducir el tiempo de ejecución del proceso anaerobio. En la Figura 1 se presenta la propuesta del biodigestor anaerobio integrado por sensores de PH, Humedad, agitador mecánico pasivo, rejilla para recolección de composta, manómetro, alimentador y salida de efluente.

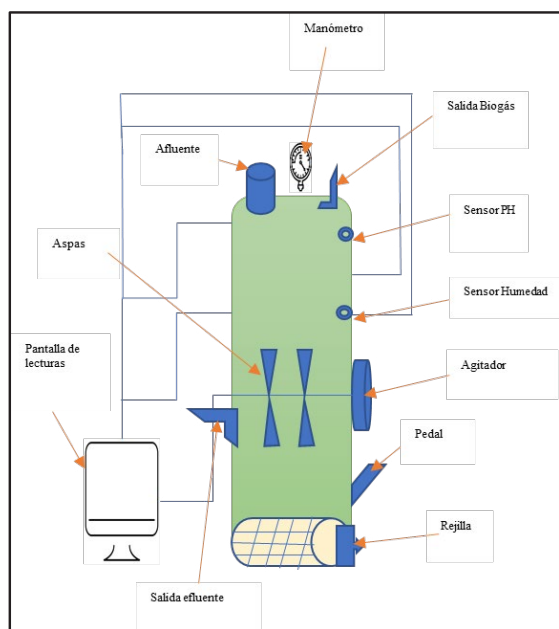


Figura 1: Esquema Biodigestor Anaerobio. (Elaboración propia)

ALCANCES

En la propuesta de este diseño de biodigestor anaerobio para la producción de abono orgánico, se considera optimizar la materia prima orgánica (Residuos domésticos) y reducir el tiempo de ejecución del proceso anaerobio.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una propuesta de biodigestor anaerobio que permita conocer y controlar factores como temperatura y PH así mismo evaluar el tiempo de retención hidráulica (TRH). Utilizando sensores conectados a una tarjeta de adquisición de datos que será manipulada usando una computadora. Se agrega al diseño un agitador mecánico pasivo y la rejilla para extracción de la composta.

Por lo que se concluye que esta tecnología representa una solución viable para el aprovechamiento de los residuos orgánicos provenientes de hogares.

Por lo tanto, aún queda como trabajo futuro validar el comportamiento de los factores en el biodigestor y la calidad de la composta obtenida.

REFERENCIAS

- Ajay, C. M., Mohan, S., & Dinesha, P. (2021). Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review. In *Waste Management* (Vol. 125, pp. 10–26). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.031>
- Flores-Nieves, M. M., Soto-Zarazúa, G. M., Rico-García, E., Zamora-Castro, S., Macías-Bobadilla, G., Hernández-López, M. S., & Sánchez-Gutiérrez, A. E. (2022). Revaluation of Local Waste through an Ecotechnologies Strategic Plan: A Case Study with Digesters. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159389>
- Granzotto, F., Aita, C., Silveira, D. D., Mayer, F. D., Pujol, S. B., Piñas, J. A. V., & Hoffmann, R. (2021). Use of anaerobic biodigester in the treatment of organic waste from a university restaurant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105795. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105795>
- Jyothilakshmi, R., & Prakash, S. V. (2016). Design, Fabrication and Experimentation of a Small Scale Anaerobic Biodigester for Domestic Biodegradable Solid Waste with Energy Recovery and Sizing Calculations. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 749–755. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2016.07.085>
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., Hashimoto, A., & Kumar Khanal, S. (2021). Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. In *Bioresource Technology* (Vol. 330). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001>
- Kaza, S., YaoLisa C., Bhada Tata, P., Van Woerden, F., Ionkova, K., Morton, J., Poveda, R. A., Saraf, M., Malkawi, F., Harinath, A., Banna, F., An, G., Imoto, H., & Levin, D. (2018, September 20). *What a Waste 2.0*. What a Waste 2.0: Una Instantánea Global de La Gestión de Residuos Sólidos Hasta 2050. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a/full>
- Miller, K. E., Grossman, E., Stuart, B. J., & Davis, S. C. (2020). Pilot-scale biogas production in a temperate climate using variable food waste. *Biomass and Bioenergy*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105568>
- Mutungwazi, A., Mukumba, P., & Makaka, G. (2018). Biogas digester types installed in South Africa: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81, pp. 172–180). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.051>
- Zhang, J., Loh, K. C., Li, W., Lim, J. W., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2017). Three-stage anaerobic digester for food waste. *Applied Energy*, 194, 287–295. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.10.116>

Red de sensores intercomunicados usando tecnología IoT

E. Salgado-Lampart, C. Morales-Morales, M. Castro-Bello, A. González-Lorence*

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo
*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río

Resumen: Este trabajo presenta la tendencia de la conectividad inalámbrica bidireccional de red de sensores usando dispositivos IoT. La intercomunicación y disponibilidad de una red de sensores se establecen como nodos IoT que requieren canales de comunicación e interfaces en lugares donde existen varios dispositivos IoT trabajando simultáneamente alimentando a una base de datos alojados en una nube. Por lo tanto, representa un problema en enviar y recibir paquetes de información no cifrados, causando vulnerabilidad a la red y problemas de latencia en su conectividad, mismo que se hace la propuesta de usar los datos en formato JSON mejorando el flujo de tráfico de datos.

Palabras clave: IoT, Nodo de Sensores, WSN

I. INTRODUCCIÓN

El surgimiento de la digitalización en el diseño, desarrollo e implementación de los procesos de producción, productos y servicios, ha desencadenado en la necesidad de obtención de datos digitales para uso, estandarización, optimización y el proceso de mejora (Abella et al., 2019).

La obtención de los datos digitales debe realizarse en sitios y condiciones diversas, generando la necesidad de implantar redes inalámbricas de sensores para recabar datos y guardarlos en una base de datos central. Estos dispositivos se instalan mediante una red inalámbrica de sensores (WSN) interconectada para recabar la información. Los dispositivos interconectados basado en el internet de las cosas (IoT) logra mantener intercomunicados una red hasta miles de dispositivos trabajando conjuntamente, tal como se menciona en (Landaluce et al., 2020).

La lectura y consulta de los datos guardados en la nube requiere de aplicaciones específicas, principalmente para dispositivos móviles, que además de consultar la información establece una comunicación bidireccional con los dispositivos para activar algún comando o simplemente una consulta de datos en dashboards de indicadores y consola de comandos de actividades.

II. PROBLEMA

En la actualidad el internet de las cosas impulsa desarrollar nuevas tecnologías, por lo que en las industrias se convierten en sistemas de comunicación complejos con conectividad en la nube para monitorear sus procesos de forma flexible y dinámica, que hoy en día son realizadas a partir de redes de sensores inalámbricos y sistemas de control distribuidos, lo cual esta nueva forma de automatización permite observar el comportamiento de los procesos en tiempo real y tomar acciones en base a la información recibida. Las redes de sensores tienen múltiples aplicaciones en los procesos como: monitorización (Al-Qurabat & Abdulzahra, 2020) del medio ambiente, agricultura, domótica, entre otros, por tanto, es de vital importancia desarrollar tecnología de comunicación robusta que permita un

enlace de comunicación bidireccional en la transmisión y recepción de una mayor cantidad de datos simultáneos, que controlen diferentes variables de los procesos, principalmente en lugares donde no se tenga acceso al internet o el costo sea muy elevado.

El modelo de las WSN está basada principalmente en la capa de conectividad de los dispositivos, su eficiencia energética y su intercomunicación, mediante paquetes de información no cifrados, lo que causa es que otros dispositivos no autorizados puedan integrarse a la red, haciéndola vulnerable a cualquier ataque ciberfísico causando violación a la seguridad de la red.

III. MOTIVACION

En las redes de comunicación inalámbrica usando tecnología IoT presentan vulnerabilidad en el protocolo de comunicación de los nodos de sensores intercomunicados. Esto deriva en que se tenga la necesidad de mejorar la eficiencia energética, eficiencia de transmisión y recepción de paquetes de datos y que los datos recolectados deban estar empaquetados y cifrados al momento de enviarse al servicio de la API y ser registrada en la nube. Esto brinda beneficios de seguridad y confiabilidad en la lectura, transmisión y envío de los datos.

IV. OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer una red de sensores intercomunicados usando tecnología IoT a través de mejorar el protocolo de comunicación.

Objetivos Específicos

1. Identificar protocolos de comunicación basadas en la transmisión de datos.
2. Seleccionar un protocolo de comunicación mediante la propuesta de usar el formato JSON.
3. Proponer un esquema de red de nodos de sensores.

V. ALCANCES

Propuesta de un esquema de red de sensores interconectados con comunicación bidireccional basado en tecnología IoT.

VI. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La propuesta de solución consiste en que cada dispositivo tendrá una red de sensores conectados inalámbricamente, quienes estarán monitoreados por un nodo central, logrando reducir el consumo de energía e incrementando su tiempo de funcionamiento. La configuración del nodo de sensores que se propone en el trabajo es como se muestra en la Figura 1.

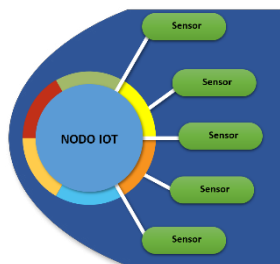


Figura 1. Nodo de sensores conectados al IoT.

La Figura 1 presenta la lectura de los datos proporcionados por los sensores agrupados en un paquete de datos en formato JSON para comunicarse con otros nodos de sensores, condicionado a mecanismos de control de envío y recepción de paquetes como medida básica de control del tráfico de datos, tal como establece en (Tian et al., 2019). La propuesta cumplirá las siguientes fases del ciclo de control interno: Arranque, Detección, Lectura, Paquete, Comunicación, Hibernación. Cada una con su propio flujo interno de actividades, ver Figura 2.



Figura 2. Fases del proceso del nodo IoT.

La propuesta de la interconexión de los dispositivos que integran la red de nodos de sensores basada en tecnología IoT se muestra en la Figura 3. Esta red permitirá comunicación bidireccional entre todos los nodos de sensores respetando la jerarquía del nodo central que dispondrá de conexión a internet para transmitir y almacenar los datos en la nube.

VII. RESULTADOS

La propuesta que se presenta identifica tres apartados de redes WSN: Componente Cloud, componente físico y componente intermedio basado en el diagrama de la red de nodos de sensores conectados a dispositivos IoT, cuya validación puede ser probada sin conexión a internet y con datos cifrados en formato JSON.

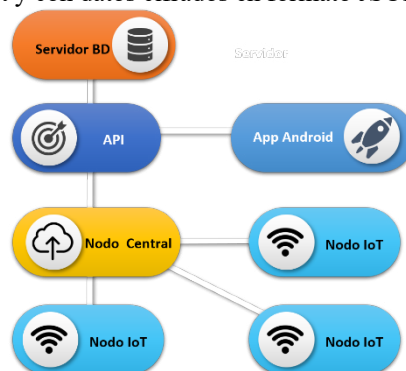


Figura 3. Diagrama de red de nodos de sensores.

VIII. CONCLUSIONES

Este trabajo establece una propuesta de red de sensores interconectados mediante tecnología IoT basado en el análisis e identificación de las propuestas reportadas en la literatura, que tienen alcance a modelos virtualizados mediante Matlab, dejando abierta su validación en pruebas de campo.

En temas de trabajos futuros se recomienda revisar aspectos de la eficiencia de la red basada en la evaluación de la optimización de: Consumo de energía y latencia, Optimización de la fiabilidad, Seguridad en la transmisión, Protocolos de comunicación, Escalabilidad de la red, seguridad en el medio de transporte al basarse en ancho de banda abierta, etc.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abella, C. S., Bonina, S., Cucuccio, A., D'Angelo, S., Giustolisi, G., Grasso, A. D., Imbruglia, A., Mauro, G. S., Nastasi, G. A. M., Palumbo, G., Pennisi, S., Sorbello, G., & Scuderi, A. (2019). Autonomous Energy-Efficient Wireless Sensor Network Platform for Home/Office Automation. *IEEE Sensors Journal*, 19(9), 3501–3512.
- Al-Qurabat, A. K. M., & Abdulzahra, S. A. (2020). An Overview of Periodic Wireless Sensor Networks to the Internet of Things. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 928(3).
- Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I., & Muralter, F. (2020). A review of iot sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks. In *Sensors* Vol. 20, Issue 9.
- Tian, X., Lee, P. M., Tan, Y. J., Wu, T. L. Y., Yao, H., Zhang, M., Li, Z., Ng, K. A., Tee, B. C. K., & Ho, J. S. (2019). Wireless body sensor networks based on metamaterial textiles. *Nature Electronics*, 2(6), 243–251.

Diseño de una casa habitación con enfoque sustentable

José F. Maldonado Catalán *. Carlos V. Marmolejo Vega**
Mirna Castro Bello***. Cornelio Morales Morales****

*Tecnológico Nacional de México Campus Chilpancingo, Chilpancingo, GRO 39090
MEX (Tel: 747-1854644; e-mail: filibertomaldonado08@gmail.com).

**Tecnológico Nacional de México Campus Chilpancingo, Chilpancingo, GRO 39090
MEX (e-mail: carlos.mv@chilpancingo.tecnm.mx)

**Tecnológico Nacional de México Campus Chilpancingo, Chilpancingo, GRO 39090
MEX (e-mail: mirna.cv@chilpancingo.tecnm.mx)

**** Tecnológico Nacional de México Campus Chilpancingo, Chilpancingo, GRO 39090
MEX (e-mail: comorales82@gmail.com)}

Abstract: According to a locally appropriate investigation, it is intended to propose a housing project with a sustainable approach for the city of Chilpancingo, Guerrero. In which the use of constructive elements and sustainable systems will be optimized, which will allow us to reduce greenhouse gas emissions, optimization of energy, water and different essential resources for human activity, proposing in the same way, a use of energy clean.

Keywords: *Sustainable housing, renewable energy, environmental impact, climate change, bioclimatic design.*

1. PROBLEMÁTICA

La organización de las naciones unidas (ONU), define el cambio climático como una transformación del clima a causa de la actividad humana, la cual altera la composición de la atmósfera a nivel mundial, así como los diferentes tipos de clima observados durante periodos de tiempo comparables (ONU, 1992). En la actualidad el calentamiento global ha causado impactos y daños generalizados e irreversibles, lo que obliga a que los gobiernos y la humanidad deban actuar urgentemente para reducir de manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero (ONU, 2023).

Según el Panel Intergubernamental de expertos (IPCC por sus siglas en inglés) en el periodo de 1990 a 2019 en los edificios construidos de manera tradicional, las emisiones de CO₂ se incrementaron en 50%, la demanda de energía en 38% y la de electricidad 161% a nivel mundial (IPCC, 2022).

Distintas alternativas de soluciones sostenibles como: el reciclaje, la generación de energías limpias, vehículos eléctricos, creación de productos ecológicos y la construcción de edificaciones o viviendas sustentables. Se considera una vivienda sustentable a la que tiene un diseño bioclimático con eficiencia energética que se logra mediante la incorporación de tecnologías sustentables en el manejo de electricidad, gas y agua. Este tipo de edificaciones deben orientarse a obtener la máxima eficiencia posible minimizando el impacto al medio ambiente (CONAVI, 2014).

En México, la norma (NMX-AA-164-SCFI, 2013), especifica las características y criterios ambientales mínimos que debe observar una edificación sustentable para minimizar el impacto ambiental y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales considerando los aspectos socioeconómicos que garanticen la habitabilidad, viabilidad e integración al entorno natural y urbano.

En Guerrero, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático presenta 10 instrumentos de políticas, como la ley de desarrollo urbano que busca el desarrollo equilibrado y sustentable de la región, pero en la realidad no promueven la construcción de edificaciones o viviendas sustentables (LEY DE DESARROLLO URBANO DEL ESTADO DE GUERRERO NUMERO 211, 2001). Dentro de estos 10 instrumentos de política climática se incluye el reglamento de construcción para los municipios del estado de Guerrero con una fecha de publicación del año 1994, que ya es obsoleto respecto de la tecnología disponible actualmente.

A nivel mundial y en particular en el municipio de Chilpancingo, las edificaciones destinadas a casa habitación carecen de un diseño sustentable y tienen en consecuencia un considerable impacto ambiental afectando los climas locales. El efecto isla de calor urbana puede aumentar de igual manera la utilización no moderada en el aire acondicionado que en consecuencia aumenta el consumo de energía, genera mas calor, emisiones de gases tipo invernadero y diferentes formas

de contaminación del aire (G. Tyler Miller y Scott Spoolman, 2019).

En esta investigación se pretende proponer un proyecto de casa habitación optimizando el uso de elementos constructivos sustentables y sistemas que permitan una disminución considerable de emisiones de gases de tipo invernadero, que optimicen el uso de energía, agua y otros recursos indispensables para las actividades humanas, procurando el aprovechamiento de energías limpias.

2. JUSTIFICACIÓN

En concordancia con los objetivos de la Agenda 2030 para combatir el cambio climático a la que nuestro país se ha adherido, es pertinente plantear acciones que coadyuven a mitigar los efectos de origen antropogénico sobre el medio ambiente, por lo que se justifica la necesidad de proponer diseños de viviendas sustentables con un mínimo de impacto ambiental.

3. OBJETIVO GENERAL

Diseñar proyectos de casa habitación con enfoque sustentable, dirigidos a tres estratos sociales de la población, que incluyan optimización de elementos constructivos y sistemas de aprovechamiento sostenible de energía y recursos naturales.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Hacer una revisión bibliográfica de los antecedentes para definir el estado del arte.
2. Realizar un análisis socioeconómico y geográfico del municipio de Chilpancingo.
3. Identificar, caracterizar materiales y elementos constructivos sustentables disponibles en la región.
4. Analizar los diferentes sistemas de aprovechamiento óptimo de energías y recursos naturales para las actividades antropogénicas.
5. Elaborar el diseño de tres proyectos de vivienda sustentable dirigida a estratos de interés social, nivel medio y nivel medio alto.
6. Evaluar el impacto ambiental de los proyectos propuestos.

5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Elaboración de tres proyectos ejecutivos para la construcción de viviendas sostenibles de interés social, accesible a clase media y a clase media alta. (Figura 1, 2 y 3). Los cuales utilizarán paneles solares como fuente de alimentación de energía eléctrica, uso de calentadores solares, sistemas

ahorradores de agua en la disposición final de las tuberías, utilización de las aguas grises con un sistema de tratamiento y de igual manera se considerará un diseño bioclimático, en el que se pretende aprovechar la iluminación natural y el viento bajo una ventilación mecánica controlable.



Figura 1. (2023) Fachada 1/Cuenta propia.



Figura 2. (2023) Fachada 2/Cuenta propia.

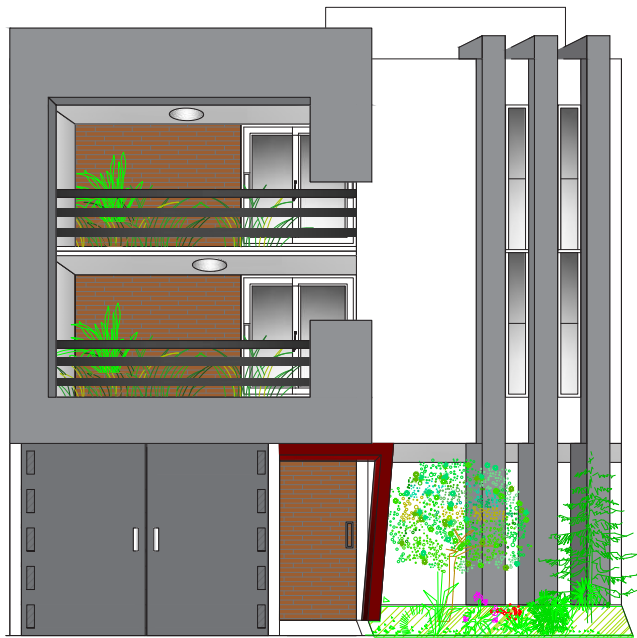


Figura 3. (2023) Fachada 3/Cuenta propia

6.ALCANCES

Los proyectos incluirán el uso de materiales sustentables, de sistemas para el aprovechamiento de energías limpias y de recursos naturales, minimizando la generación de gases efecto invernadero con insumos disponibles en la región del municipio de Chilpancingo, Gro. Será el primer prototipo de vivienda sustentable con el uso de nuevas tecnologías en la región. Estos proyectos tendrán un cambio no solo en los habitantes de Chilpancingo sino en todo el estado de Guerrero, ya que al utilizar adecuadamente una vivienda sustentable y aprovechando todos los recursos de la región, se creará la conciencia en el cuidado del planeta y con la respuesta favorable de la vivienda se podrán proponer nuevos proyectos de casa habitación con enfoque sustentable en otras regiones del estado de Guerrero.

El alcance del proyecto será un prototipo de casa habitación sustentable de interés social, clase media, y media alta con uso de materiales endémicos y tecnologías del estado de Guerrero, y así contribuir desde la ingeniería civil a la promoción y cuidado del medio ambiente, disminuyendo las emisiones de gases efecto invernadero.

BIBLIOGRAFÍA

CONAVI. (2014). Vivienda Sustentable en Mexico. Depledge, Joanna., & Lamb, Robert. (2005). Cuidar el clima : guía de la Convención Marco sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto. Secretaría de la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC).

G. Tyler Miller y Scott Spoolman, (2019). Ciencia ambiental, primera edición.

IPCC (2022). Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: www.ipcc.ch.

LEY DE DESARROLLO URBANO DEL ESTADO DE GUERRERO NUMERO 211 (2001) 'GRO-L-DesUrb2015_01'.

Muciño, M. (2022). Proyecto ejecutivo "Mi casa ecológica" disminuyendo la huella de carbono. México: Especialidad en Ingeniería Civil UNAM.

NMX-AA-164-SCFI (2013). NORMA MEXICANA NMX-AA-164-SCFI-2013 EDIFICACIÓN SUSTENTABLE- CRITERIOS Y REQUERIMIENTOS AMBIENTALES MÍNIMOS SUSTAINABLE BUILDING-CRITERIA AND MINIMAL ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS.

ONU (1992). CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

ONU. (2023). Synthesis Report for the Sixth Assessment Report during the Panel's 58th Session held in Interlaken. In Diriba Korecha Dadi. Panmao Zhai.

Extracción de azúcares reductores a partir de los residuos orgánicos generados durante la producción de mezcal.

Ramírez-Guadarrama José Antonio, *Gómora-Hernández Julio César, Ventura-Cruz Sagnite, Jiménez-Cedillo Miriam Jennifer.

División de Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango, Santiago – La marquesa 22, 52650, Santiago Tilapa, Estado de México, México. Email*: julio_gh@test.edu.mx

Resumen: La producción de mezcal trae consigo la generación de residuos sólidos con alto contenido de celulosa y hemicelulosa, los cuales son polisacáridos que pueden descomponerse en azúcares individuales a través de tratamientos químicos sencillos. En este trabajo se evaluó la producción de azúcares reductores mediante hidrólisis con 3 ácidos inorgánicos diferentes y con cloruro férrico, utilizando bagazo de agave como materia prima. De los químicos utilizados, el cloruro férrico mostró el mayor potencial para la producción de azúcares reductores con un rendimiento de 21.99 g de azúcar por cada 100 g de bagazo. El estudio de la cinética de producción de azúcares reveló que las condiciones propuestas en este trabajo no favorecen la producción de azúcares cuando se utiliza bagazo de agave como materia prima.

Keyword: Biomasa lignocelulósica, hidrólisis ácida, revalorización, sal metálica, tratamiento químico.

1. INTRODUCCION

Una problemática importante en el sector agroindustrial es la generación excesiva de residuos sólidos durante la producción del mezcal, los cuales se desechan en enormes cantidades al aire libre y no se les realiza ningún tratamiento, contribuyendo de esta manera a la generación de líquidos lixiviados y gases dañinos para el medio ambiente. Los residuos provenientes de la producción de mezcal están compuestos por 43% de celulosa, 19% hemicelulosa y 15% lignina (Paniagua-Pérez *et al.*, 2021). Debido a su alto contenido de carbohidratos, este residuo se ha empleado con fines biotecnológicos para la obtención de productos de valor agregado (Moran-Aguilar, 2018). La celulosa es el biopolímero más abundante, está formado por unidades de glucosa unidas por enlaces glucósidos, y puede transformarse en azúcares individuales mediante tratamientos diversos, siendo la hidrólisis química uno de los más empleados. La hidrólisis ácida es un método eficiente para la extracción de azúcares reductores a partir de la celulosa y de la hemicelulosa presente en residuos agrícolas (Franco *et al.*, 2009). Con base a la problemática de la generación excesiva de residuos agrícolas, así como la composición rica en carbohidratos de estos residuos, en este trabajo se pretende extraer la mayor cantidad de azúcares reductores presentes en el bagazo de agave mediante un tratamiento químico de una etapa, generando de esta manera un producto de interés comercial a partir de un residuo abundante.

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Caracterización del bagazo de agave

El bagazo de agave fue obtenido de una fábrica productora de mezcal, una vez que la planta pasó por todo su proceso de

cocción, fermentación y destilado. El bagazo se dejó secar al aire y posteriormente se molió mecánicamente y se tamizó a un tamaño de partícula menor a 150 μm . El contenido de humedad se determinó utilizando el método estándar, mientras que los porcentajes de holocelulosa y lignina, se obtuvieron utilizando el método del clorito de sodio y solubilización con ácido sulfúrico, respectivamente (Gómora-Hernández *et al.*, 2020).

2.2 Hidrólisis de los residuos agrícolas

Se pesaron muestras de 1 g de bagazo de agave seco y triturado dentro de viales de 50 mL con ayuda de una balanza analítica. Cada una de las muestras se mezcló con 15 mL de una disolución, se sellaron con un tapón de hule y una tapa de aluminio y se colocaron dentro de un horno a 100 °C durante 3 horas. Las disoluciones utilizadas fueron hechas con ácido sulfúrico, clorhídrico, fosfórico y cloruro férrico a la concentración de 1 M. El experimento que mostró la concentración más alta de azúcares se repitió durante los tiempos de 30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos, con la intención de determinar la velocidad de la reacción de hidrólisis. Transcurrido el tiempo de reacción, las muestras se sacaron del horno por duplicado y se dejaron reposar hasta que disminuyera su temperatura, posteriormente se filtraron utilizando papel filtro de poro medio sin ayuda de vacío. Una vez filtradas las muestras, la fase líquida fue almacenada en refrigeración a 4 °C, mientras que la muestra sólida se lavó con agua destilada y se almacenó en frascos de plástico para posteriormente secarla en un horno de calentamiento a una temperatura de 55 °C.

2.3 Determinación de azúcares reductores

La cuantificación de azúcares reductores se llevó a cabo utilizando el método del ácido 3-5 dinitro salicílico (DNS), el

cual se preparó agregando 30 gr de tartrato de sodio y potasio tetra-hidratado en una solución de 50 ml de hidróxido de sodio 2 M. Posteriormente, se agregó lentamente 1 gr de DNS y se agitó constantemente hasta que se disociara por completo para finalmente aforar a un volumen de 100 mL. La fase líquida de cada uno de los experimentos de hidrólisis se utilizó para determinar el contenido de azúcares reductores. Para ello, se prepararon diluciones 1:10 con agua destilada, y se mezclaron 500 μ L de esta dilución con 500 μ L del reactivo DNS dentro de tubos Hach de 12 mL. Los viales se llevaron a un tanque de agitación y calentamiento durante un tiempo de 5 minutos a 70 °C. Finalmente, se agregaron 10 mL de agua desionizada en cada muestra y se midió su absorbancia en un espectroscopio Hach dr-6000. La curva de calibración se preparó con soluciones de glucosa en un rango de concentraciones de 0.5 g/L hasta una 4.5 g/L. La longitud de onda utilizada para el análisis por espectroscopia Uv-Vis fue de 540 nm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Producción de azúcares reductores

La composición del bagazo de agave fue de: 4.23% de humedad, 8.42% extractivos, 63.05% holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) y 15.62% de lignina.

Las pruebas de hidrólisis realizadas con los diferentes ácidos mostraron una baja producción de azúcares reductores, de todos los ácidos, el ácido sulfúrico mostró la mayor concentración alcanzando un valor de 2.44 g/L, lo cual equivale a un rendimiento de 3.66 g por cada 100 g de bagazo de agave. El ácido fosfórico tuvo la menor producción con tan solo 1.54 g/L y un rendimiento de 2.31 g por cada 100 g. El ácido clorhídrico alcanzó un rendimiento de 2.94 g / 100 g, y una concentración de azúcares reductores de 1.95 g/L. El rendimiento más alto fue de 21.99 g por cada 100 g de bagazo, obtenido en el experimento con cloruro férrico.

3.2 Cinética de producción de azúcares reductores

Con base a la producción de azúcares observada para cada uno de los reactivos químicos después de 180 minutos, se realizó una cinética de producción de azúcares a diferentes tiempos de reacción utilizando cloruro férrico. El comportamiento de la producción de azúcares reductores fue ascendente en los tiempos, temperatura y concentración de reactivo propuestos en este proyecto. Al aumentar el tiempo de operación la producción de azúcares se incrementó, alcanzando un valor máximo de 21.99 g por cada 100 g de bagazo al término del experimento.

A los 60 minutos, se observó que la producción de azúcar ya había alcanzado aproximadamente el 50% del rendimiento máximo, con un valor de $10.92 \text{ g} \pm 0.18 \text{ g}$ por cada 100 g de bagazo de agave, esto sugiere que la materia prima tiene una fase fácilmente hidrolizable que pudiera estar atribuida a la fracción hemicelulósica del bagazo.

La Figura 1 muestra el comportamiento de producción de azúcar en función del tiempo de reacción utilizando cloruro férrico.

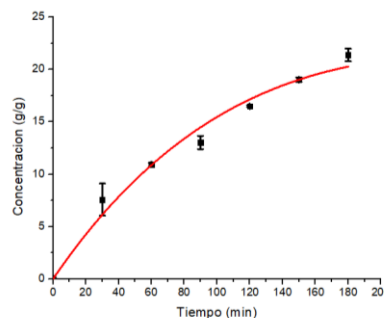


Figura 1. Producción de azúcares reductores durante la hidrólisis con cloruro férrico.

La curva de producción de azúcar se ajustó al modelo cinético de Saeman, para determinar las constantes de velocidad de la producción y descomposición de los azúcares. La constante de velocidad asociada a la producción de azúcares ($k_1=0.00364 \text{ min}^{-1}$) fue menor en comparación con la constante de velocidad de descomposición ($k_2=0.00429 \text{ min}^{-1}$), lo cual sugiere que las condiciones de operación propuestas favorecen la producción de aldehídos y no la estabilización de los azúcares como producto final. El coeficiente de correlación R^2 del ajuste no lineal fue de 0.992.

La importancia de calcular las constantes cinéticas de la producción de azúcares reductores radica en la determinación del tiempo óptimo de reacción, así como verificar que las condiciones de operación propuestas favorecen a la producción de azúcares, ya que estos son usados para la producción de compuestos de interés comercial como biocombustibles y bioplásticos.

4. CONCLUSIONES

Los ácidos inorgánicos no son viables para la extracción de azúcares reductores a partir del bagazo de agave. El rendimiento más alto de producción de azúcares fue de 21.99 g / 100 g obtenido con el cloruro férrico 1 M. El aumento en el tiempo de contacto propicia un incremento en la concentración de azúcares reductores. Con base al estudio cinético, las condiciones de operación no favorecen a la producción de azúcares utilizando bagazo de agave como materia prima.

REFERENCIAS

- Franco, A. G., Yépes, P. N. M., & Sánchez, H. A. V. (2009). Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia et technica*, 15(42), 284-289.
- Gómora-Hernández J. C., Carreño-De-León M. del C., Flores-Álamo N., Hernández-Berriel M. del C., Fernández-Valverde S. M. (2020). Kinetic and thermodynamic study of corn cob hydrolysis in phosphoric acid with a low yield of bacterial inhibitors. *Biomass and Bioenergy*. 143, 105830.
- Moran Aguilar, M. G. (2018). Estudio de la sacarificación del bagazo de caña de azúcar y Agave angustifolia para la producción de azúcares fermentables. Tesis para la obtención del grado de maestría en ciencias de ingeniería bioquímica. Instituto tecnológico de Veracruz, México.
- Paniagua-Perez G., Sarabia-Sereno Y. L., Belmonte-Izquierdo Y. (2022). Una segunda vida para los residuos de la industria mezcalera. *inventio* 17, 1-7.

Construcción y operación de una celda de combustible vegetal con planta ornamental para la producción de energía

López-González Karen Michel^a, Gómora-Hernández Julio César^{a*}, Allende-Peña Jacobo Marcos^b, Ventura-Cruz Sagnite^a

^aDivisión de Ingeniería Ambiental, ^bDivisión de Ingeniería Mecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango, Santiago – La marquesa 22, 52650, Santiago Tilapa, Estado de México, México. Email*: julio_gh@test.edu.mx

Resumen: Este trabajo pretende mostrar el potencial de la planta ornamental *Agapanthus africanus* para la generación de voltaje y amperaje a través de una de una celda de combustible. La construcción de la celda se realizó con materiales caseros y se evaluó el efecto del tamaño de ánodo hecho a base de acero inoxidable sobre la generación de voltaje. El sistema construido con un ánodo de 90 cm y un cátodo de 30 X 30 cm mostró la mejor generación tanto de corriente como de voltaje. Además, los datos experimentales mostraron que el aumento en el área de contacto entre el electrodo y las raíces de la planta favoreció a la generación de voltaje. La generación de corriente se observó a partir de los 20 días de operación y alcanzó los valores máximos entre los 40 y 50 días. Finalmente, se demostró que un ánodo a base de acero inoxidable no afectó la vitalidad de la planta en el período de tiempo en que se llevó a cabo el experimento.

Palabras clave: Sistemas bioelectroquímicos, energía renovable, sustentabilidad, recursos naturales.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, una de las problemáticas más importantes es la quema excesiva de hidrocarburos que genera un impacto negativo al ambiente debido a la producción de gases de efecto invernadero. Además, los costos de producción de los combustibles fósiles son elevados y se incrementan constantemente. Por ello, el uso de energías renovables y sustentables es una alternativa a nivel mundial para disminuir el uso de hidrocarburos.

La Celda de Combustible Microbiana Vegetal (CCMV) es un dispositivo cuyo fin es obtener energía eléctrica a través de microorganismos que convierten la energía química de las plantas en energía eléctrica (Azri *et al.*, 2018). La CCMV se compone por un material aceptor de electrones llamado ánodo y un cátodo situado en la superficie de la tierra y en contacto con el aire atmosférico. La CCMV es un sistema bioelectroquímico que se deriva de la Celda de Combustible Microbiana (CCM) convencional, con la peculiaridad de que el sustrato para los microorganismos electrógenos son los bulbos rizomatosos de las plantas. La idea general de la CCMV, es la producción de energía mediante un proceso natural y sustentable que no genere contaminantes, tenga un tiempo de vida prolongado y permita su uso para la alimentación de dispositivos eléctricos de baja demanda (Gómora-Hernández *et al.*, 2020). Por ello, el objetivo del presente trabajo fue estudiar la generación de voltaje y amperaje en una CCMV operada con planta ornamental y evaluar el efecto del tamaño de electrodo sobre la eficiencia de la celda.

2. MATERIALES Y METODO

2.1 Construcción de las CCMVs

La Planta *Agapanthus africanus* comúnmente conocida como agapando, se eligió por su amplia variedad de entornos a los que puede ser dispuesta y utilizada para fines estéticos, así como por su alta densidad de rizoma.

En cuatro diferentes macetas, se perforó un orificio pequeño a una altura de 13 cm de la base de la maceta y se llenó hasta esa altura con tierra y hojarasca, a la altura del orificio se colocó un alambre de acero inoxidable, el cual fungió como ánodo. El cátodo se construyó a base de fibra de carbono y se ubicó en la parte superior de la planta. Los electrodos se conectaron a un cable estañado para posteriormente determinar el voltaje y amperaje con ayuda de un multímetro (Figura 1). Las dimensiones de los electrodos se resumen en la tabla 1.

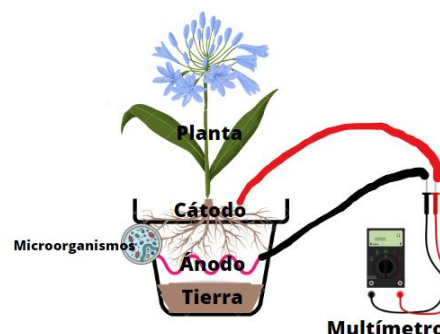


Figura 1. Diagrama de la CCMV

Tabla 1. Dimensiones de los electrodos

Celda	Longitud del ánodo (cm)	Dimensiones del cátodo (cm)
CCMV-1	90	20 x 20
CCMV-2	70	15 x 15
CCMV-3	70	25 x 25
CCMV-4	90	30 x 30

2.2 Determinación de Sólidos Volátiles Totales

Se pesaron 5 gramos de tierra con hojarasca de cada una de las CCMV's en cápsulas de aluminio y se secaron en un horno durante 24 horas a una temperatura de 55 °C, después se dejaron reposar en un desecador durante 30 minutos y se pesaron, el método se repitió hasta que no hubo variación en los pesos de las muestras. Una vez alcanzado el peso constante, las capsulas con las muestras se introdujeron en una mufla y se calcinaron a una temperatura de 550 °C por dos horas, el residuo sólido sobrante se pesó y se relacionó con la materia inorgánica y cenizas presentes en la tierra. La determinación se realizó por triplicado. La importancia de la determinación de SVT radica en la estimación indirecta de la cantidad de materia orgánica en el suelo, la cual favorece a la generación de energía.

Tabla 1. % Humedad de cada planta

Planta	SVT (%)
1	59.05
2	68.60
3	57.26
4	67.84

2.3 Monitoreo de las CCMVs

El voltaje y amperaje de cada una de las CCMV's se monitoreó con ayuda de un multímetro Truper-MUT-33 dos veces al día, de lunes a viernes. La primera lectura se tomó alrededor de las 12:00 horas y la segunda a las 18:00 horas, esto con la finalidad de observar el efecto de la intensidad lumínica sobre el voltaje y amperaje. La primera lectura de voltaje y amperaje se tomó después de 30 minutos de haber concluido la instalación de la celda.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El voltaje y amperaje se registró durante 50 días, en algunas mediciones como en las realizadas en los días 16 y 45 se observó que la falta de humedad en la tierra generó valores bajos de voltaje y amperaje, esto se observa en los puntos de las gráficas de las Figuras 2 y 3. Lo anterior sugiere que la humedad de la tierra es un parámetro importante para la generación de energía en las celdas.

En cada una de las CCMV', durante las primeras lecturas la corriente se observó por debajo de los 400 mA y el voltaje fue mayor a los 700 mV. Transcurrida la primera semana, las lecturas comenzaron a bajar, ejemplo de ello fue la celda CCMV-2 que mostró voltajes cercanos a los 600 mV. Los voltajes más altos fueron próximos a los 1200 mV, y se observaron en los sistemas CCMV-1, CCMV-2 y CCMV-4. A pesar de este comportamiento, las celdas operadas con el ánodo de 90 cm mantuvieron en promedio un rango de voltaje de 600 a 1000 mV, mientras que la celda CCMV-3 mostró la mayoría de los voltajes por debajo de 600 mV.

La generación de amperaje se observó a partir de los 20 días de operación en todas las CCMV's, sin embargo, en las celdas operadas con un ánodo de 90 cm se alcanzó la corriente más alto entre los 40 y 50 días de operación. El sistema CCMV-4 además de alcanzar los voltajes más altos mostró una corriente más estable. Las celdas operadas con el ánodo de 70 cm mostraron intensidades de corriente por debajo de los 1000 mA.

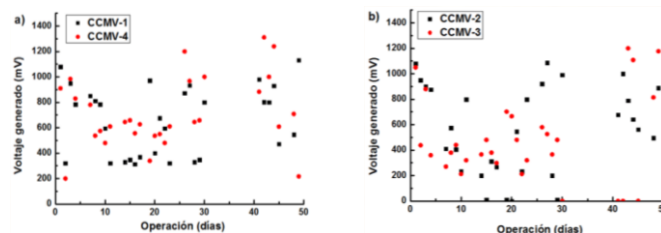


Figura 2. Voltaje obtenido en las CCMV's

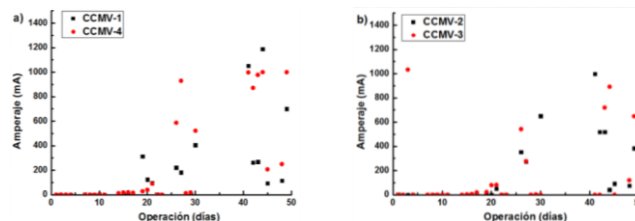


Figura 3. Amperaje obtenido en las CCMV's

4. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales sugieren que la conformación de la CCMV a base de *Agapanthus africanus* fue eficiente para producir energía, los voltajes y amperajes fueron más altos en las celdas construidas con el ánodo de 90 cm de longitud. Con base a los resultados de voltaje y amperaje, el sistema CCMV-4 fue el más eficiente para la generación de energía.

REFERENCIAS

- Gómora-Hernández J. C., Serment-Guerrero J. H., Carreño-De-León M. del C., Flores-Alamo N. (2020). Voltage production in a plant-microbial fuel cell using *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 19 (1) 227-237. Doi: 10.24275/rmiq/1A542.
- Azri Y. M., Tou I., Sadi M., Benhabyles L. (2018). Bioelectricity generation from three ornamental plants: *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* and *Papyrus diffusus*. *International Journal of Green Energy*. 15, 254-263. Doi: 10.1080/15435075.2018.1432487.

Reconocimiento de imágenes aplicado a sistema electromecánico para exploración espacial

Stefany Joana Castillo Padrón*. Layonet Salvador Buenrostro Pérez.**

*TecNM Campus Iztapalapa III, México, CP. 09630
MEX (Tel: 55-6007-6199; e-mail: stefanyjcp13@outlook.com).

**TecNM Campus Iztapalapa III, México, CP. 09630
MEX (e-mail: layonetsalvador@gmail.com)

Abstract: The project is based on the development and modelling of an electromechanical system that focuses on the area of reconnaissance and space exploration, this with the clear objective of developing low-cost technologies compared to other similar projects, the population to which it focuses The project is at the educational level where different areas of technology will be promoted, such as programming, electronics and design.

Keywords: Robotics, electronics, computer vision, rover, technology and education.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas electromecánicos son una parte esencial de las misiones de exploración espacial, ya que permiten el movimiento y el funcionamiento de los equipos y vehículos espaciales en ambientes hostiles y extremos. Estos sistemas utilizan la combinación de la electricidad y los dispositivos mecánicos para convertir la energía eléctrica en movimiento y realizar diversas tareas en el espacio.

Como se menciona (NASA, 2021), desde la década de los 70 's los científicos han enviado naves espaciales a Marte, entre los cuales se encuentran vehículos robóticos que son llamados "Rovers" que se encargan de conducir en diversos puntos para recolectar muestras que ayudarán a los científicos en su investigación y descubrimiento de nuevos materiales o químicos que componen la estructura rocosa del planeta explorado.

La ingeniería de sistemas electromecánicos para la exploración espacial implica el diseño, la construcción y la prueba de sistemas que deben funcionar en condiciones extremas, como altas temperaturas y radiación, vibraciones y presiones extremas. Estos sistemas deben ser confiables, seguros y capaces de cumplir con los objetivos de la misión, al igual es muy importante la utilización de algoritmos inteligentes que nos ayuden a realizar un correcto funcionamiento del sistema, utilizando los sensores de percepción colocados en el robot, como lo son cámaras y dispositivos de sensado.

El reconocimiento de imágenes es una de las ramas de la Inteligencia Artificial, donde se demuestra la capacidad de una computadora para analizar y entender el contenido de alguna imagen en cuestión, de tal forma que lo haría un ser humano, ej. a continuación se muestra una imagen obtenida del sistema de

visión, el cual identifica las piedras y obstáculos que se encuentran en el camino (*Imagen 1*).



Imagen 1. Imagen segmentada para la detección de elementos rocosos

También se puede utilizar aprendizaje profundo (Deep Learning) el cual pertenece a las técnicas de Inteligencia Artificial para aprender automáticamente mediante el análisis de los datos, esto para lograr obtener ciertas características de las imágenes, posteriormente se entrena un modelo con el cual se podrán reconocer algunos patrones y con ello clasificarlos en diversas categorías.

Este proyecto de investigación presenta el diseño y desarrollo de un prototipo electromecánico autónomo acompañado de reconocimiento de imágenes que se enfoca en la detección y evasión de obstáculos, en este caso de objetos rocosos, utilizando tecnologías de bajo costo, dando así la oportunidad para implementar dicho proyecto en el desarrollo educativo.

1.1 Objetivos

Elaborar un sistema robótico de bajo costo combinado con el reconocimiento de imágenes que realice actividades de reconocimiento y evasión de obstáculos (rocas, por ejemplo).

2 DESARROLLO

A continuación se desglosan las etapas del desarrollo del prototipo en su forma física, así como sus requerimientos.

2.1 Diseño

Como primer paso se dieron las siguientes especificaciones del prototipo para comenzar con su diseño:

Diámetro	146 mm.
Longitud	140 mm.
Peso Máximo	1.0 kg.

Como siguiente paso se realizó el modelado 3D de las ruedas de acuerdo a las especificaciones detalladas anteriormente (*Imagen 2*), tomando en cuenta un diseño sencillo y adaptable para zonas como lo son: tierra, pasto y arena, de igual forma se diseñó el modelo general del prototipo, el cual involucra la parte mecánica, electrónica, energía y sensado, así como el chasis de la base principal y aquellos elementos que ayudarán a conjuntar cada uno de los componentes (*Imagen 3*), con ayuda de software para modelado 3D.

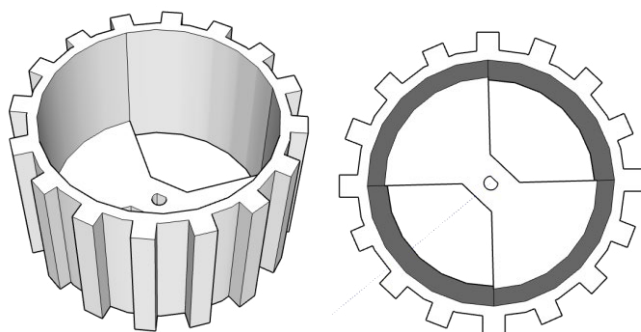


Imagen 2. Diseño 3D de ruedas en SketchUp

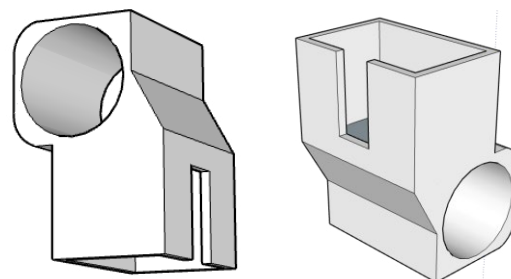


Imagen 3. Diseño 3D de coples para unión de componentes

2.2 Componentes electrónicos

Los componentes electrónicos que se utilizarán son los siguientes:

- Magnetómetro modelo HMC5883L
- Módulo ESP32 modelo OV2640
- Módulo GPS GY_GPS6MV2
- Acelerómetro

Algunos de estos, estarán interconectados para realizar ciertas funciones (*Diagrama 1*).

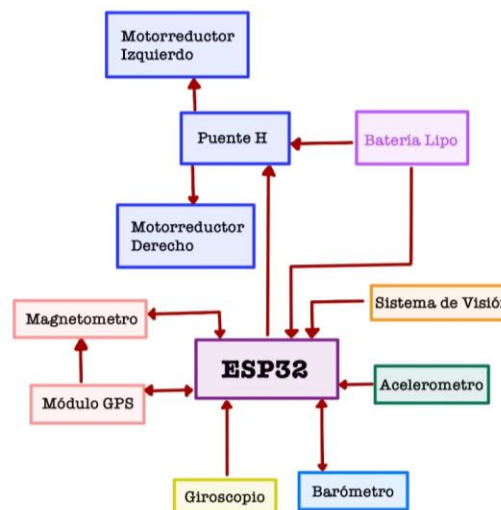


Diagrama 1. Interconexión de dispositivos electrónicos y mecánicos

2.3 Programación

Se utiliza el lenguaje de programación **Python** en conjunto con la biblioteca de **OpenCV** para la detección y análisis de las imágenes obtenidas, como se muestra en la *imagen 1*, donde se aplicaron los siguientes algoritmos:

2.3.1 Filtro Gaussiano.

Pasa por un proceso de suavizar la imagen, en el cual reducimos las variaciones de intensidad entre los píxeles mediante la obtención del promedio entre cada uno de ellos, eliminando ruidos provocados por condiciones externas en las cuales no podemos influir.

Ruido: Información no deseada que contamina la imagen.

A continuación se muestra un ejemplo donde se aplica este Filtro Gaussiano para la disminución de ruido en la imagen tratada. (Imagen 4 e Imagen 5)



Imagen 4. Imágenes procesadas para disminución de ruido

2.3.2 Algoritmo Canny

Desarrollado por John F. Canny, el algoritmo de Canny se encarga de la detección de bordes. Una vez que la imagen es captada por el sistema de visión esta pasa a procesarse por medio de OpenCV para así segmentar y por último analizar los datos obtenidos que nos ayudarán a detectar aquellos elementos rocosos que nos interesan. (Imagen 6)

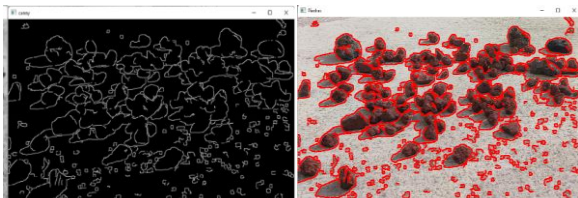


Imagen 5. Procesamiento por algoritmo de Canny

Aunado a esto, los datos telemétricos que nos ayudarán a la exploración y el reconocimiento del área son: longitud, latitud y aceleración, obteniendo así resultados más óptimos.

3. RESULTADOS

El prototipo de exploración realizó distintas pruebas en entornos variados, donde se obtuvieron resultados esperados y se cumplieron los objetivos establecidos con recursos limitados. Al igual la parte electromecánica funcionó correctamente y los diseños realizados servirán para realizar mejoras continuas del dispositivo.

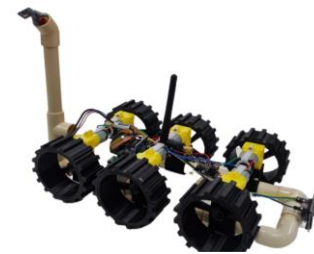


Imagen 6. Prototipo físico del robot



4. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis y las pruebas realizadas se determina que los algoritmos aplicados en conjunto a la lectura gráfica de imágenes, dieron los resultados esperados de una manera óptima, el dispositivo electromecánico es capaz de detectar elementos rocosos en su proceso de exploración.

Este sistema puede ser utilizado para la detección y clasificación de objetos por su clase de características, ej. en una línea de producción o en agricultura para detectar frutas o verduras maduras.

De igual forma se encontraron nuevos retos, como lo es la creación de placas PBC (Printed Circuit Board) que son placas de desarrollo impreso con el fin de mejorar la presentación del robot, y evitar problemas de conexiones de los componentes eléctricos en conjunto y el rediseño del sistema mecánico para generar más eficacia en los resultados.

Se aplicaron los conocimientos de herramientas del área de ingeniería y tecnología como son: programación, diseño, modelado 3D, electrónica, robótica y se logró generar el prototipo de bajo costo.

REFERENCIAS

OpenCV Library. (2021, February 9). Home. OpenCV. <https://opencv.org/>

Sosa-Costa, A. (2017, July 14). Algoritmo de Canny - ▷ Cursos de Programación de 0 a Experto © Garantizados. ▷ Cursos de Programación de 0 a Experto © Garantizados. <https://unipython.com/algoritmo-de-canny/>

The Mars Rovers. (s/f). Nasa.gov. Recuperado el 23 de marzo de 2023, de <https://spaceplace.nasa.gov/mars-rovers/sp/>

Tema 3: Filtros. (n.d.). Alojamiento.us.es. Retrieved March 24, 2023, from <http://alojamientos.us.es/gtocoma/pid/tema3-1.pdf>

EVALUACIÓN DE DOS ATRAYENTES PARA EL CONTROL *DE Drosophila suzukii* EN EL CULTIVO DE LA FRAMBUESA

Jorge Armando Peralta-Nava*, María de Jesús. Ramírez-Ramírez*, Osvaldo Amador-Camacho*, Faustino. Ramírez-Ramírez*, , Christian Guillermo Murguía Vadillo* y Joana Lizeth González Torres*

*Tecnológico Nacional de México Campus Tlajomulco, Jal., Departamento de Ciencias Agropecuarias Km. 10 carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. CP 45640 Tel (33) 3772-4426 Y 3772-4427
E-mail: jorge.pn@tlajomulco.tecnm.mx

RESUMEN

La Drosophila suzukii, son pequeños insectos que tienen una gran poligrafía, es decir que pueden afectar a varias especies de plantas, lo que las ha convertido en las plagas importantes de la agricultura mundial, no solo por los daños y pérdidas económicas que causan sino también porque pueden ser eficientes vectores de virus. El objetivo del presente estudio es la evaluación de dos atrayentes para el control del Drosophila suzukii en el cultivo de frambuesa para reducir los niveles de daño. La investigación se desarrolló del mes de agosto a diciembre del 2022 en Usmajac, Municipio de Sayula Jalisco, se evaluó en planta de Frambuesa de 1años. Se establece un diseño experimental de bloques al azar con seis bloques y seis trampas por bloque. Los tratamientos evaluados consistieron en: T1 Vinagre de manzana 200 ml c/u y T2 Levadura 125g, 1kg de azúcar / 10 L de agua. las trampas se cambiaron cada 7 días durante 15 semanas; se en la captura de Drosophila suzukii hembras el T1 capturó más en la semana 4 el T1 capturó un 43.12% más que el T2, en la semana 10 el T1 capturo un 24.34% más que el T2 (, en la semana 15 el T1 capturo un 45.23% más que el T2; Drosophila suzukii macho solo hubo diferencias en la semana 8 donde T2 capturo un 37.93% más que el T1 y para la captura de Drosophila suzukii Total solo en la semana 10 el T1 capturó un 13.67% más que el T2 (Levadura), en la semana 15 T1 capturó 33.11% más que. Las trampas con vinagre atraen mas a las hembras ya que es la que con mayor frecuencia se reproduce y oviposita en fruta madura y sus larvas se alimentan de la pulpa de la fruta.

Keywords: *Drosophila suzukii*, frambuesa, Vinagre de manzana, Levadura y tratamientos

1. INTRODUCCION

En México la frambuesa y la zarzamora son dos especies de frutillas con el mayor crecimiento en el mercado global, atribuido principalmente a sus características nutrimentales., lo que ha posicionado al país como uno de los principales productores de frutillas en el mundo (Muratalla-Lúa, A. 2018). Jalisco encabeza el cultivo de berries, siendo el primer lugar en superficie sembrada y en valor

económico, por venta de la fruta la entidad captó 708 millones de pesos durante 2022 (SIAP, 2022).

De la misma manera las producciones agrícolas han tenido un gran crecimiento en la producción de frambuesa ha estado exenta de tal fenómeno de demanda por los consumidores. No obstante, el problema de las plagas en la agricultura puede convertirse en la principal limitante de la producción, teniendo como reto el manejo adecuado de plagas. (García, 2008) entre las que se encuentran la

Drosophila suzukii quien ha generado pérdidas 511 millones de dólares en los cultivos de frutos rojos (fresa, cereza, frambuesa, arándanos y moras) afectados en las regiones del oeste de Estados Unidos (California, Oregon y Washington) en 2008, asumiendo una pérdida media de 30 %.

Las infestaciones de esta plaga pueden reducir severamente los rendimientos del cultivo además de afectar la calidad del fruto para su consumo e industrialización, lo que dificulta su comercio internacional (Berry, 2012; Walsh et al., 2011; Calabria et al., 2010).

En México, el primer registro de esta mosca fue en 2011 (SCOPE-SENASICA, 2015), en los municipios de Los Reyes, Michoacán y Cuauhtémoc, Colima.

Posteriormente, Walsh et al. (2011) demostraron, en base al uso exclusivo de insecticidas, que resulta mucho más oneroso no controlar la plaga que controlarla. Por lo mencionado anteriormente se tuvo como objetivo evaluar dos atrayentes para el control del *Drosophila suzukii* en el cultivo de frambuesa.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló del mes de agosto a diciembre. Se evaluó el efecto de las trampas en el cultivo de Frambuesa con plantas de 1 año. Durante el periodo de evaluación se realizaron las labores culturales, manejo del cultivo tradicional y monitoreo constante.

2.1 Descripción del Ensayo Experimental

El trabajo de investigación se establece utilizando un diseño experimental de bloques al azar con seis bloques y seis trampas por bloque. Los tratamientos evaluados consistieron en:

Tratamiento	Concentración
1 VINAGRE	200 ml
2 LEVADURA	125g, 1kg de azúcar / 10 L de agua

2.2 Manejo y Monitoreo de las Trampas

El cambio, monitoreo y conteo de individuos por trampa se realizó cada siete días durante 15 semanas Variables a Evaluar

2.3 Variables a evaluar.

Cada siete días se contabilizó el número de hembras, macho y total capturados en cada una de las trampas. Las variables evaluadas son la siguientes:

Drosophila suzukii Hembras

Se contabilizo el numero de hembras capturadas por trampa y la forma de identificarlas es la siguiente: Las hembras son un poco más grandes que los machos (Fig. 1). El ovipositor es de gran tamaño, posee abundantes dientes oscuros (aserrado) y está fuertemente esclerosado, siendo estos caracteres los que confieren a la hembra la capacidad única en la familia Drosophilidae de penetrar la epidermis de frutos sanos para oviponer (Walsh et all, 2011; Tochen et all, 2014)

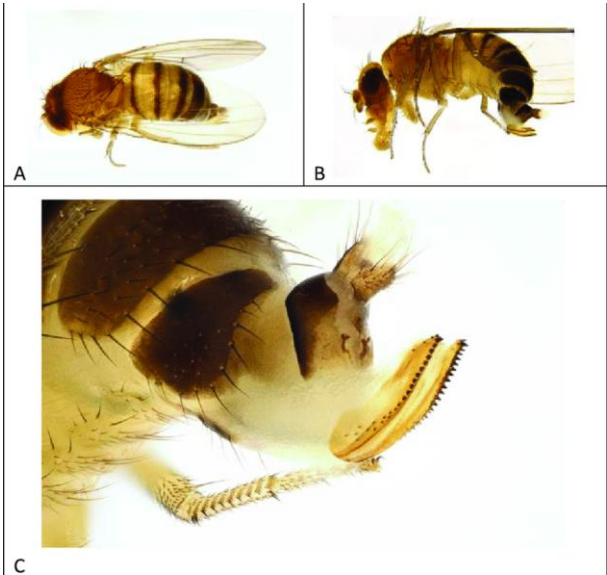


Fig 1. Hembra adulta de D. suzukii. Vista dorsal (A) y ventral (B). Detalle lateral, mostrando detalle de aparato ovipositor aserrado (C). Créditos: Chris Thomas

Drosophila suzukii Macho

Se contabilizo el numero de machos capturadas por trampa y la forma de identificarlos es el siguiente:

Los machos una de sus características es que los adultos miden entre 2 a 3 mm de largo, poseen ojos rojos y alas con manchas negras,

Los machos poseen una mancha negra en el margen distal de las alas, ubicada en el centro de la primera vena alar (Fig. 2). En las patas anteriores, tienen dos conjuntos de peines sexuales con setas negras ubicados en los dos primeros tarsos, que se disponen de forma paralela al eje de la extremidad. Estos caracteres facilitan la identificación en campo, aunque debe realizarse una confirmación mediante el análisis de la genitalia, ya que pueden encontrarse individuos recién emergidos que carecen completamente de las manchas, dado que estas comienzan a desarrollarse 10 h después de la emergencia (Hauser, 2011).

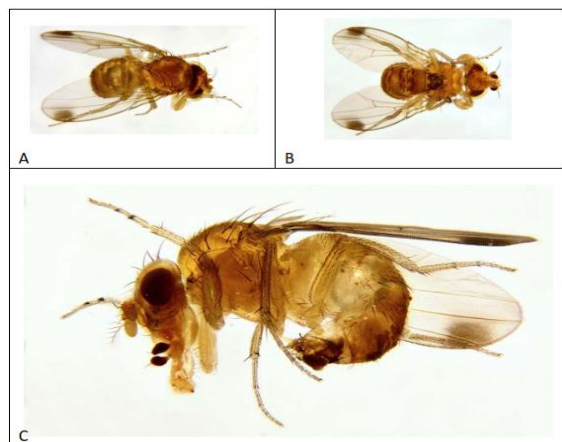


Fig. 2. Macho adulto de *D. suzukii*. Vista dorsal (A) y ventral (B), mostrando mancha alar característica. Vista lateral (C), detalle del doble peine sexual presente en el primer par de patas, carácter distintivo de la especie. Créditos: Chris Thomas.

Conteo Total de *Drosophila suzukii*

Esta variable se contabilizó el total de individuos capturados por trampa.

Los datos obtenidos de cada una de las variables se les realizó análisis de varianza, prueba de medias utilizando la paquetería estadística de InfoStat Version 2017. Las medias obtenidas se graficaron.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos de las variables evaluadas se les realizaron ANOVA y prueba de Tukey ($P < 0.05$) para determinar si hay diferencias significativas entre los tratamientos.

3.1 *Drosophila suzukii* hembras

Para esta variable el ANOVA y prueba de Tukey ($p < 0.05$) (Tabla 1) arrojó que de las 15 semanas evaluadas se encontraron diferencias significativas en la semana 4, 10 y 15.

Tabla 1. ANOVA y Prueba de Tukey para la variable Conteo total de *Drosophila suzukii* hembra.

	S4*		S10 *		S15*	
TRAT	M	G	M	G	M	G
VINAGRE	32	A	30.4	A	25.2	A
LEVADURA	18.2	B	23	B	13.8	B
CV	17.86		6.91		14.64	

*Significativo; M=Media; G=Agrupamiento Tukey

En la Fig. 3 se observa la dinámica y captura de hembras de acuerdo los tratamientos. por lo que en la semana 4 el T1(vinagre) capturó un 43.12% más hembras que el T2(levadura), en la semana 10 el T1(vinagre) capturo un 24.34% más hembras que el T2 (levadura), en la semana 15 el T1 (vinagre) capturo un 45.23% más hembras que el T2 (levadura) en la gráfica Fig.3 se muestra como en las semanas 4, 10 y 15 las trampas de vinagre tuvieron mayor número de individuo en hembras. Además el vinagre (T1) durante la mayor parte del periodo de evaluación fue el que mantuvo el mayor número de capturas *Drosophila suzukii* Hembras

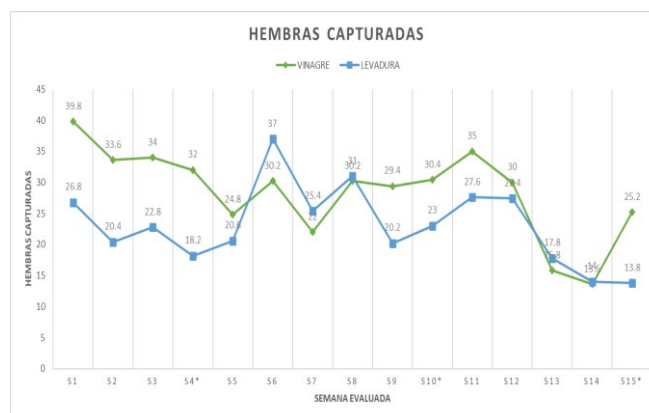


Fig. 3. Hembras de *Drosophila suzukii* capturadas por semana

3.2 *Drosophila suzukii* machos.

En este conteo el ANOVA (Tabla 2) y prueba de Tukey ($p < 0.05$) arrojó que de las 15 semanas evaluadas se encontraron diferencias significativas en la semana 8.

Tabla 2. ANOVA y Prueba de Tukey para la variable Conteo total de *Drosophila suzukii* machos.

S8*		
Tratamiento	M	G
VINAGRE	7.2	B
LEVADURA	12	A
CV	13.67	

*Significativo; M=Media; G=Agrupamiento Tukey

En la semana 8 el T2 (levadura) capturó un 37.93% más machos que el T1(vinagre), en la Fig. 4 se muestra que de las 15 semanas 9 el T2 con levadura fue mas preferido por los machos debido a que se tuvo mayor numero captura individuos macho.

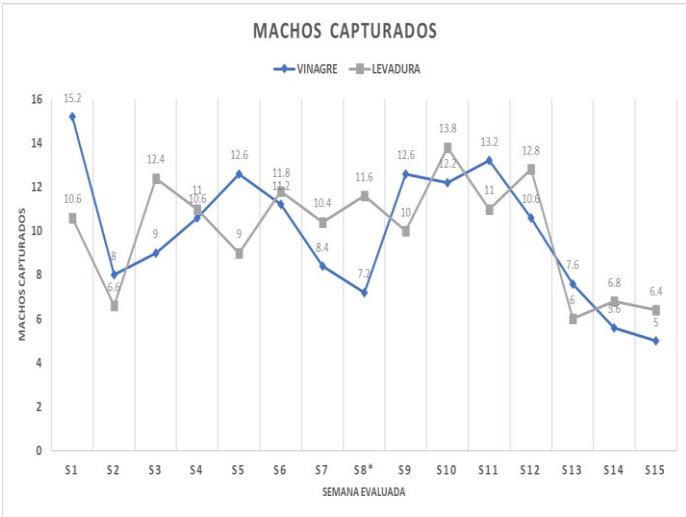


Fig. 4. Machos de *Drosophila suzukii* capturadas por semana

3.3 Conteo total de *Drosophila suzukii*

En este conteo el ANOVA (Tabla 3) y prueba de Tukey ($p < 0.05$) arrojó que de las 15 semanas

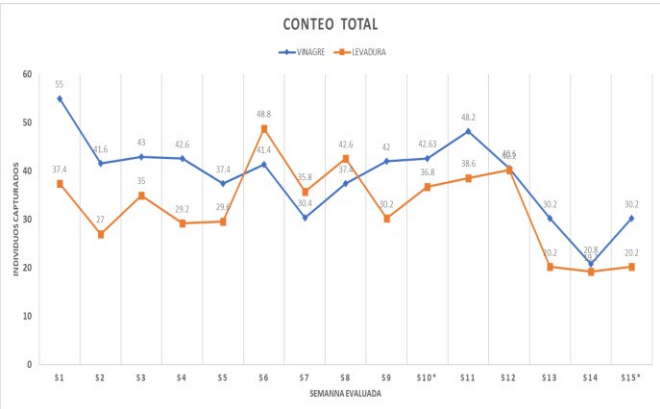
evaluadas se encontraron diferencias significativas en la semana 10 y 15.

Tabla 3. ANOVA y Prueba de Tukey para la variable Conteo total de *Drosophila suzukii* hembra.

F10 *			F15*	
Trat	M	G	M	G
VINAGRE	42.6	A	30.2	A
LEVADURA	36.8	B	20.2	B
CV	6.09		17.18	

*Significativo; M=Media; G=Agrupamiento Tukey

En la semana 10 el T1 (Vinagre) capturó un 13.67% más que el T2 (Levadura), en la semana 15 T1 capturó 33.11% más individuos que el T2. En la gráfica Fig. 3 se observa como de las 15 semanas, en 13 semanas las trampas de vinagre tuvieron mayor número de individuo capturados por semana.



Grafica 3. Total de *Drosophila suzukii* capturadas por semana

3.4 Discusión:

La mosca *Drosophila* es atraída por el vinagre de manzana, su olor característico dulce debido a que este hecho a base de fermentos un efecto sinérgico del ácido acético, el etanol y otros volátiles (Montoya et al.,2010)

La mosca de la fruta (*Drosophila suzukii*) se siente atraída por el aroma de la levadura, la mosca se alimenta de los hongos y bacterias de la levadura y esta se beneficia del medio de transporte que ofrece el insecto con fines reproductivos. (Balbin et al.,2000).

Las conclusiones de la investigación indican que el olor emitido por este y otros microorganismos busca atraer a los insectos y así ellos dispersen sus células reproductoras en el medio ambiente. (Alvarado, 2000)

4. CONCLUSIONES

Tras el monitoreo y el número de individuos capturados fue notable que el tratamiento 1 a base de vinagre de manzana fue el que mayor captura de individuos obtuvo durante las 15 semanas que fueron evaluadas

En la captura de *Drosophila suzukii* hembras el T1 con vinagre fue el que más las atrajo por lo que este atrayente se puede considerar para aumentar el número de trampas con esta solución debido a que las hembras son las que dañan por que se reproducen y ovipositan en la fruta madura y así de esta forma afectan la calidad de la fruta creando mermas importantes en la comercialización.

El T2 con levadura fue el que atrajo mas a los machos.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarado MC 2000.. Estimación de los componentes genéticos y ambientales de los tiempos de desarrollo huevo-pupa y pupa-adulto de algunos mutantes del cromosoma II de *Drosophila melanogaster* [trabajo de grado]. Santiago de Cali: Departamento de Biología, Facultad de ciencias, Universidad del Valle.
- Balbín A, Rojas Y, Chica C, Campos A. Efecto de la temperatura y del medio de cultivo de dos generaciones hijas de un cruce dihíbrido en *Drosophila melanogaster*. Acta biol Colomb. 2000;1(5):47-57.
- Berry, J. A. 2012. Pest Risk Assessment: *Drosophila suzukii*: spotted wing drosophila (Diptera: Drosophilidae) on fresh fruit the USA. Ministry for Primary Industries. 42 p.
- Calabria, G., Máca, J., Bächli, G., Serra, L., and Pascual, M. 2010. First records of the potential pest species *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in Europe. Journal of Applied Entomology, 136: 139-147.
- Garcia. (2008). Manejo de Plagas en la Producción de Hortalizas. Retrieved. Recuperado el 15 de octubre de 2022, de from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243002>
- Funes, C.F., Kirschbaum, Daniel, Escobar, Lorena y Heredia, A.M. (2018). La mosca de las alas manchadas, *Drosophila suzukii* (Matsumura), nueva plaga de las frutas finas en Argentina
- Hauser M. 2011. A historic account of the invasion of *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera: Drosophilidae) in the continental United States, with remarks on their identification. Pest Manag Sci 67: 1352-1357.
- Montoya P., Toledo J. O y E. Hernández (eds.), Moscas de la Fruta: Fundamentos y Procedimientos para su Manejo, 2010. S y G editores, México, D.F. pp. 133-146.
- Muratalla-Lúa, A. (2018). La producción de frambuesa y zarzamora en México. Agro Productividad, 6(5). Recuperado a partir de <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/475>
- SCOPE-SENASICA. 2015. Estatus fitosanitario de Mosca del vinagre de alas manchadas. 18-05-2015.
- SIAP. (2022). INFORURAL. Recuperado el 25 de Noviembre de 2022, de INFORURAL: <http://infosiap.siap.gob.mx/opt/agricultura/intencion/intencioncosechachaperenecultivo2018.pdf>
- Tochen S, Dalton D, Wiman N, Hamm C, Shearer P, Walton V. 2014. Temperature-related development and population parameters for *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) on cherry and blueberry. Environ Entomol 43: 501-510.
- Walsh D.B., Bolda M.P., Goodhue R.E., Dreves A.J., Lee, J., Bruck D.J., Walton V.M., O'Neal S.D., Zalom F.G. (2011). *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae): invasive pest of ripening soft fruit expanding its geographic range and damage potential. Journal of Integrated Pest Management, 2(1): 1-7.

Propuesta de un Sistema Robótico Autónomo enfocado a la Asistencia Educativa

Jason Hernandez Gonzalez. Abigail Roque Gonzalez.
Ing. Layonet Salvador Buenrostro Perez.

**TecNM, Campus Iztapalapa III, CP 09637
MEX (Tel: 56-2196-4381; e-mail: L211100129@iztapalapa3.tecnm.mx).
(e-mail: L221100073@iztapalapa3.tecnm.mx
(e-mail: layonetsalvador@gmail.com)*

Abstract: Los Human Robotic System (HRS), la robótica de asistencia se dedica a crear y evaluar sistemas robóticos que tienen como objetivo mejorar la eficacia de las operaciones realizadas por humanos, donde estos sistemas pueden interactuar con el usuario y apoyar a las tareas para las cuáles fueron diseñados, por ejemplo dar recomendaciones, entregar un paquete, repartir comida, entre otras actividades. El desarrollo de este sistema nos permitirá la asistencia y automatización en la consulta de información institucional, en donde su principal propósito es que el usuario adquiera dicha información de manera precisa mejorando así la calidad asistencia del Tecnológico Nacional de México Campus Iztapalapa III.

Keywords: Robot, Sistema Inteligente, Automatización, Asistencia Educativa, Mapeo y Tecnología.

1. INTRODUCCIÓN

Se observó una escasez de información dentro de la institución lo que genera diversas dificultades para la toma de decisiones a causa de la falta de datos actualizados y precisos que no pueden ser proporcionados a los usuarios.

En la actualidad, la educación se ha convertido en un pilar fundamental para el desarrollo personal y profesional de los individuos. Es por eso que es importante que la atención educativa sea de calidad, y en este sentido, la información administrativa juega un papel clave en el proceso. Con base a lo mencionado se ve el aplicativo de este sistema cómo una mejora en la calidad de asistencia de apoyo el que brindar información de carácter administrativo como: fechas de registro, inscripción o información sobre dónde se localiza la dirección o algún profesor; son el principal objetivo.

Actualmente hay diferentes aplicaciones de las tecnologías de asistencia, donde países como Alemania (DEU), existen robots de asistencia médica como “Garmi”, cuya función y finalidad es ayudar a la falta de personal sanitario capacitado en geriatría, con base a las diferentes aplicaciones; este proyecto ayudará a obtener información de una forma precisa mediante el uso de la tecnología (Geriatrics Research Group, s.f.).

La necesidad de soluciones tecnológicas en este ámbito ha impulsado a la creación de un prototipo que logre ser de apoyo para la asistencia informativa orientada a los usuarios.

1.1 Objetivo

Desarrollar un prototipo de robot asistente para atender tareas informativas dentro del Tecnológico Nacional de México Campus Iztapalapa III.

1.2 Metodología

Se implementará una metodología cuantitativa que nos permite obtener resultados sobre la compatibilidad con las interacciones ejercidas de los usuarios, dentro de los datos obtenidos se observa el funcionamiento y la implementación dentro de la institución ayudando en su desarrollo.

2. DESARROLLO

El robot deberá poder operar de manera autónoma en la institución, lo que implica la necesidad de desarrollar sistemas de navegación avanzados y mecanismos de toma de decisiones en tiempo real. La seguridad también es una preocupación importante al implementar este prototipo, pues dependerá de el uso según la necesidad requerida por la institución.

De los puntos más importantes a tomar en cuenta para su diseño y posterior desarrollo es la disminución de los riesgos que éste pudiera ocasionar o sufrir, dentro del medio en el que se desenvuelve, por ello es importante mencionar que el asistente cuente con sensores y algoritmos que controlen de una forma correcta la navegación y de esta forma evitar accidentes que pudiesen resultar graves para los alumnos o cualquier otro individuo. Así mismo se ve necesario integrar tecnologías de innovación tales como: el reconocimiento de imágenes, sistema de mapeo para el avance del robot, etc, dando como función que el prototipo siga instrucciones de forma autónoma.

Dentro de las etapas de este sistema robótico se tienen consideradas las siguientes:

2.1 Diseño y construcción de la parte física del Robot

El proceso de diseño y control del robot debe ser adecuado al entorno en el que se desempeñará el prototipo, ya que este requerirá características específicas para cumplir dichas funciones; las cuales son principalmente la estructura mecánica, el sistema de percepción, sistema de control, sistema de energía, y actuadores que ayudarán al movimiento del robot como lo menciona (Barrera, 2019, p. 13).

2.2 Componentes

Se realizó una estimación de los componentes presentados en el diagrama cuya relación aprovechara cada componente para el funcionamiento del mismo, por consiguiente se utilizarán dos placas de desarrollo tales como un microcomputador el cual se utilizará el modelo Raspberry Pi 3, que permite usar el sistema de visión por computadora y la detección de obstáculos por el sistema LIDAR. Por otra parte estos componentes estarán conjuntos con un microcontrolador el cual nos permite el accionamiento de una serie de elementos electrónicos interconectados en el prototipo.

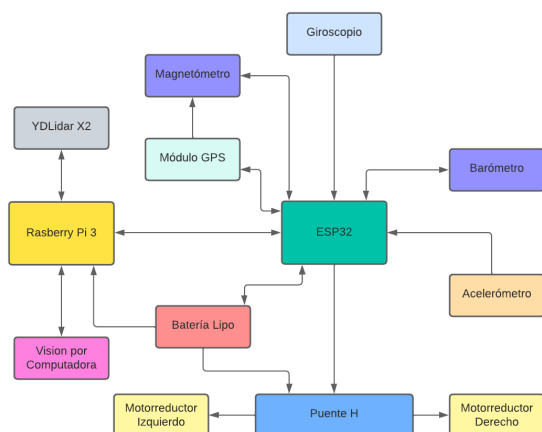


Imagen 1: Diagrama de los componentes que incluirá la estructura electromecánica del prototipo.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de cómo un usuario puede interactuar utilizando la interfaz gráfica que tiene el sistema robótico.



Imagen 2: Interacción humana /robot.

2.3 Visión por Computadora y Mapeo del Entorno

El uso de visión por computadora nos permitirá que el prototipo pueda interpretar y comprender imágenes de su entorno en

tiempo real, de la misma manera en que lo hacemos los seres humanos. Los sistemas de visión por computadora utilizan una serie de algoritmos y técnicas de procesamiento de imágenes para detectar patrones, formas, colores y texturas, esto favorece ampliamente a la automatización y control del robot.

El mapeo con el sistema LIDAR (Light Detection And Ranging) (Geospatial, 2021) nos da la funcionalidad de construir un mapa detallado de un área u entorno, donde proporciona datos precisos y detallados sobre la geometría y características de los objetos, este permite al prototipo mantener la capacidad de desplazarse por un espacio asignado, integrando una tecnología capaz de hacer mediciones en grandes distancias con una gran precisión, un ejemplo de ello ver imagen 3:

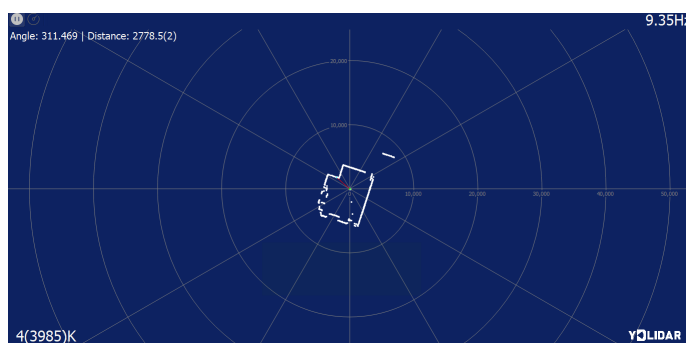


Imagen 3 : Mapeo del entorno con sistema LIDAR.

2.4 Interfaz Gráfica

La forma en la cual interactúa el robot con el usuario sería mediante una interfaz basado en una aplicación móvil donde contiene iconos que permiten a los usuarios crear secuencias de acciones para controlar el robot así como también obtener la información solicitada esto con ayuda de un análisis previo el cual nos ayudará a generar un interfaz gráfica amigable y fácil de usar así como se menciona, La usabilidad en aplicaciones móviles se refiere a la facilidad con la que los usuarios pueden interactuar con la app y hacer uso de ella. Es un factor importante para el éxito de las apps, ya que influye en la imagen de la marca, la experiencia de usuario y el posicionamiento (Affede, s.f.).

Se desarrollará un estudio del diseño responsivo e interactivo, basándose en la experiencia de usuario para que este enfoque en la interacción natural con el usuario en conjunto con la capacidad de proporcionar información y retroalimentación en tiempo real. Se aplicarían principios de diseño centrado en el usuario para que el robot tenga una apariencia amigable, una personalidad coherente e informativa.

2.5 Programación

En esta área se verá enfocado al desarrollo de nuevos algoritmos para generar respuestas específicas que se deseen incorporar al dispositivo, su principal objetivo será el mejorar la

deducción de respuestas con base a un aprendizaje profundo para que este prototipo robótico pueda brindar información de manera precisa y concreta; adaptándose conforme lo indique o requiera el usuario.

3. CONCLUSIONES

El uso del prototipo Robótico de Asistencia Educativa podría ser de gran utilidad para toda la comunidad del Tecnológico de Iztapalapa III. La información generada por el robot puede ser de interés tanto para los alumnos como para los docentes usuarios. Así mismo, el prototipo puede fomentar el interés en las nuevas tecnologías y mejorar las relaciones entre usuarios, ayudando así a mantenerse al día en la vanguardia tecnológica.

Se espera lograr resultados bastantes óptimos en cuanto al sesgo de información con la aplicación de dicho sistema robótico, ya que estará al alcance de todos; a corto plazo lo planteado en este documento tendrá su proceso de desarrollo, pruebas y aplicación, mientras que a largo plazo puedan ser implementadas nuevas tecnologías para las mejoras en el ámbito pedagógico.

REFERENCIAS

Barrera, J., & Pinilla, G. (2019). *Diseño de un sistema de control de temperatura para un invernadero a través de la plataforma Arduino*. Revista Científica de Ingeniería y Automatización, 16(2), 35-43. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1790&context=ing_automatizacion

Affde. (s. f.). Usabilidad de aplicaciones móviles: todo lo que necesitas saber .Affde. <https://www.affde.com/es/mobile-app-usability.html>

Geospatial (2021). *Tecnología LIDAR*. Recuperado el 24 de marzo de 2023, de <https://www.geospatial.com.co/servicios/tecnologia-lidar.html>.

Geriatric Research Group. (s.f.). Garmi. Technical University of Munich. Recuperado el 20 de abril de 2023 de <https://geriatric.mirmi.tum.de/en/garmi/>

Método bifuncional para la extracción de azúcares y el mejoramiento de las propiedades adsorbentes del biomaterial

¹Rodríguez-Ramírez Diana Elizabeth, ^{1*}Jiménez-Cedillo Miriam Jeniffer,
¹Gómora-Hernández Julio César, ¹Ventura-Cruz Sagnite

*División de Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Estudios
Superiores de Tianguistenco Carretera Tenango-La Marquesa Km 22, Santiago
Tianguistenco, Estado. de México, México. C. P. 52650, *e-mail: jeniffer.jimenezc@test.edu.mx*

Resumen: La producción de productos agrícolas ha ido en aumento para la satisfacción y necesidades del ser humano, pero a partir de este tipo de productos se generan muchos residuos lignocelulósicos, los cuales no son aprovechados. En los últimos años, este tipo de residuos se ha utilizado en diferentes aplicaciones, como la producción de energía, azúcares reductores, obtención de celulosa microcristalina y como materiales adsorbentes para la eliminación de contaminantes. En México uno de los residuos agrícolas de tipo lignocelulósico que se genera en grandes cantidades es *Zea mays*, comúnmente conocido como rastrojo de maíz, el cual se obtiene de la mazorca de este producto, por lo tanto, el objetivo del trabajo fue utilizar este residuo, al cual se le realizó una hidrólisis ácida, se le caracterizó y se evaluó de manera preliminar el porcentaje de remoción de colorante índigo carmín y Cr(VI) a diferentes temperaturas.

Palabras clave: Residuos lignocelulósicos, olote (*Zea mays*), biosorción, colorantes, cromo hexavalente, azúcares reductores.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad es la contaminación generada por nosotros mismos, afectando a los elementos que nos rodean como lo son: el suelo, aire y el más importante el agua ya que en las últimas generaciones se ha visto y comprobado por diversos estudios la disminución de este recurso. El agua es un elemento muy importante para la vida del ser humano, la crianza de animales, frutos, verduras y el desarrollo de las industrias (Auge, 2002). Estudios arrojan que una de las principales actividades contaminantes para el agua provienen de las industrias como la textil, la de curtido de pieles y de autopartes, las cuales generan la presencia de metales pesados como el cromo hexavalente [Cr(VI)] y colorantes como el índigo carmín (IC) en cuerpos de aguas. Tanto los metales como los colorantes son elementos tóxicos que generan contaminación y efectos a la salud de los seres vivos y al medio ambiente (Morrison *et al.*, 2020). Actualmente se están utilizando residuos de tipo lignocelulósico como biosorbentes para el tratamiento de aguas residuales, buscando eliminar diversos contaminantes. Existen diferentes tipos de biosorbentes, su capacidad de remoción depende de su método de modificación y del tipo de contaminante. Los residuos lignocelulósicos (son materiales que contienen lignina, celulosa y hemicelulosa) que provienen principalmente de las actividades agrícolas o forestales y que no son aprovechados como alimento o en otro tipo de uso industrial, los cuales se están utilizando para la generación de energía de manera sustentable, sin embargo, para esto solo se

aprovecha el licor generado por el tratamiento de la biomasa, quedando la parte sólida sin aprovechar, la cual por sus características pueden ser buenos adsorbentes de contaminantes, por lo tanto, en este trabajo se utilizó el olote (*Zea mays*), para evaluar su porcentaje de remoción de índigo carmín y cromo hexavalente a diferentes temperaturas, después de una modificación química con ácido fosfórico diluido, así como cuantificar la producción de azúcares monoméricos durante la hidrólisis ácida.

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Recolección del olote

Los residuos del olote se obtuvieron de cultivos pertenecientes al Municipio de Xalatlaco, Estado de México, se secaron a temperatura ambiente, se tritaron en un molino mecánico y se tamizaron las partículas con un diámetro menor a 250 µm. Las partículas de olote obtenidas se caracterizaron acorde a lo descrito en el apartado 2.3.

2.2 Acondicionamiento y tratamiento del olote

Previo a los estudios de sorción, las partículas de olote se sometieron a una hidrólisis química con ácido fosfórico 1.34 M a una temperatura de 110 °C durante 5 horas de reacción. La

relación sólido líquido que se utilizó para la modificación fue de 1 g de olote seco y triturado por cada 15 mL de ácido diluido. Para alcanzar la temperatura de operación deseada, se utilizó un horno de calentamiento con un control electrónico de temperatura. Transcurrido el tiempo de reacción, el reactor se sacó del horno y se dejó enfriar a temperatura ambiente y se filtró, la fase sólida se lavó con agua hasta obtener pH neutro y se puso a secar a una temperatura de 60 °C por una semana. El material obtenido se caracterizó para determinar su contenido de holocelulosa y lignina, y también se utilizó para evaluar sus propiedades adsorbentes. La fase líquida se utilizó para determinar el contenido de azúcares reductores utilizando el método del ácido 3-5 dinitrosalicílico (DNS) a una longitud de onda de 540 nm (Miller, 1959).

2.3 Determinación de holocelulosa y lignina

Para realizar las determinaciones de holocelulosa y lignina en el olote natural y modificado, se eliminaron previamente a los extractivos, los cuales consisten en materiales que son solubles en solventes polares. Su eliminación se hizo de acuerdo con el método estándar para la preparación de la madera libre de extraíbles.

Se pesaron 4 g de olote previamente secado en un cartucho de extracción, con ayuda de una pinza se colocó en el cuerpo del extractor del sistema de reflujo Soxhlet, se puso a flujo con 120 mL de una mezcla 1:2 etanol-tolueno (80-40 mL) hasta no observar coloración en el sifón del cuerpo extractor. El cartucho se colocó una noche en la estufa a una temperatura de 60 °C, posteriormente se le colocaron 120 mL de agua destilada, esto con la finalidad de eliminar los rastros del solvente, el reflujo se detuvo cuando el bulbo del sifón no presentó coloración, el cartucho se sacó del cuerpo extractor para colocarlo en un vidrio de reloj y secar durante 6 días en la estufa a una temperatura de 50 °C.

La determinación de holocelulosa se realizó por duplicado de acuerdo con el método del clorito, el cual se basa en la acción del dióxido de cloro cuyos productos de reacción acuosa y caliente hacen que la lignina se separe en forma soluble. El dióxido de cloro se genera a partir del clorito de sodio y ácido acético.

1g de muestra seca y libre de extractivo se pesó y se colocó en un recipiente con una solución de 0.3 g de clorito de sodio en 32 mL de agua destilada, a la que previamente se había añadido 2 gotas de ácido acético. Los recipientes preparados se pusieron a reaccionar en un baño de calentamiento a 75 °C durante 4 horas. Cada 30 minutos se agitaron y cada hora se añadió lentamente 2 gotas de ácido acético y 0.32 gramos de clorito de sodio. Transcurridas las 4 horas y una vez enfriados los recipientes, las muestras sometidas a reacción se filtraron utilizando papel filtro previamente pesado. Cada una de las muestras se lavó con 200 mL de agua caliente y posteriormente con 100 mL de acetona. Con ayuda de las pinzas se colocó cada

papel filtro con muestra dentro de una cápsula de aluminio previamente calcinada y pesada y se colocó en una estufa a 40 °C durante 4 días. Al término del secado, las muestras se colocaron en un desecador por 30 minutos y se pesó rápidamente para evitar la hidratación de la holocelulosa.

La determinación de la lignina se realizó de acuerdo con el método D1106-56. Para ello se pesó 1 g de muestra seca libre de extractivos en un vaso de precipitado de 500 mL, se adicionaron 25 mL de ácido sulfúrico al 72% (v/v) y 2.5 mL de ácido bromhídrico al 40% (v/v) y se dejó reposar por 2 horas agitándolo cada 30 minutos. Posteriormente se le adicionaron 100 mL de agua destilada y se hirvió durante 5 minutos. La muestra contenida en el vaso de precipitado se filtró con papel filtro previamente pesado, y se lavó con agua destilada caliente hasta tener un pH neutro. Con ayuda de una pinza se colocó el papel filtro en una cápsula previamente calcinada y pesada, y se secó a 50 °C durante una semana. Al término del secado, la muestra se colocó en un desecador por 30 minutos y posteriormente se pesó.

El contenido de holocelulosa y lignina presente en el olote natural y modificado se calculó por diferencia de pesos.

2.4 Evaluación preliminar del proceso de sorción

Se pesaron dentro de tubos cónicos de 15 mL, muestras de 0.1 g de olote natural (ON) y modificado (OM), y se mezclaron con 10 mL de una solución de concentración inicial de 50 mg/L del colorante IC y se pusieron en contacto por 24 horas a temperatura ambiente y también a 30°C dentro de un tanque de calentamiento con agitación, al término de este tiempo se separaron las fases, la fase líquida se analizó mediante espectroscopia UV-Vis a una longitud de onda de 306 nm, para determinar el % de remoción de este contaminante con los materiales. El desarrollo descrito anteriormente se realizó para evaluar el % de remoción del Cr(VI) a una concentración inicial de 5 mg/L. El Cr(VI) se cuantificó mediante la norma NMX-AA-044-SCFI-2014.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Hidrólisis ácida

En la **Figura 1** se muestra un cambio significativo en el color después de la modificación química, ya que antes de ella el color era beige y después de la modificación se apreció un tono rosa pálido. Después del tratamiento se observó también la formación de conglomerados de partículas y una cierta porosidad, sin embargo, una caracterización a detalle es sugerida para comprender los cambios fisicoquímicos en el material.



Figura 1. Olote antes y después de la modificación

3.2 Holocelulosa y lignina en el olote natural y modificado

El contenido de holocelulosa disminuyó después del tratamiento químico, mientras que el porcentaje de lignina aumentó de $19.44 \% \pm 0.075$ a $24.61 \% \pm 0.25$. Este comportamiento fue observado previamente por Láinez *et al.* (2018), y se atribuye a la transformación parcial de la celulosa amorfa y hemicelulosa en azúcares reductores. La remoción de la lignina soluble fue baja y por ello el porcentaje de lignina después del tratamiento químico resultó mayor.

En la **Tabla 1**, se muestran los resultados obtenidos de holocelulosa y lignina antes y después del tratamiento químico. Es importante mencionar que las desviaciones en todos los casos fueron menores a ± 1 .

Tabla 1. Contenido de holocelulosa y lignina en el olote natural y modificado

	Natural	Modificado
Holocelulosa	67.96 ± 0.059	63.79 ± 0.423
Lignina	19.44 ± 0.075	24.61 ± 0.251

La solubilización parcial de la celulosa y hemicelulosa se verificó mediante la cuantificación de azúcares reductores presentes en el hidrolizado ácido, determinado mediante el método DNS. El contenido de azúcares fue de 16.45 g/L , lo cual equivale a un rendimiento másico de 24.68 g de azúcar por cada 100 g , el cual resultó mayor a lo determinado previamente por Gómora-Hernández *et al.* (2022), durante la hidrólisis con ácido fosfórico y clorhídrico del bagazo de avena a una concentración de 2.2 M y 100°C durante 300 minutos de tiempo de reacción.

3.3 Obtención del % de remoción

De acuerdo con los datos obtenidos de la cuantificación tanto del índigo carmín como del Cr(VI) , después del proceso de sorción a temperatura ambiente y a 30°C (**Figura 2 y 3**). Indican que el olote natural (ON) a temperatura ambiente, olote natural a 30°C (ONT), olote modificado (OM) a temperatura ambiente y olote modificado a 30°C (OMT), removieron casi en su totalidad al cromo hexavalente, presentando porcentajes de remoción de $96.68 \pm 0.07 \%$, $96.90 \pm 0.16 \%$, $98.73 \pm 0.07 \%$, y $98.31 \pm 0.35 \%$ respectivamente, lo que indica que para este contaminante de tipo inorgánico no es necesario realizarle

una modificación ya que de forma natural remueve de manera eficaz al Cr(VI) , Cruz *et al.*, (2017) menciona que los contaminantes de forma inorgánica son más factibles de ser removidos con cualquier tipo de adsorbentes, no importando en qué condiciones de temperatura se desarrolle el proceso de sorción, siempre serán removidos de forma eficaz.

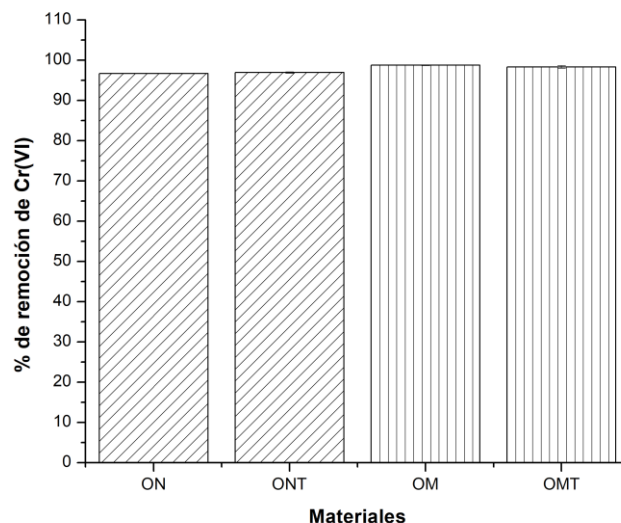


Figura 2. Porcentaje de remoción de Cr(VI) .

Los materiales evaluados muestran porcentajes de remoción del índigo carmín menores al los obtenidos para el Cr(VI) , los valores obtenidos son $25.87 \pm 0.68 \%$ para el olote natural a temperatura ambiente, $53.63 \pm 0.97 \%$ para olote natural con temperatura a 30°C , $75.96 \pm 1.76 \%$ para el olote modificado a temperatura ambiente, y $64.62 \pm 0.85 \%$ para olote modificado con temperatura a 30°C , en este caso el material modificado y utilizado para el proceso de sorción a temperatura ambiente presenta un mayor porcentaje de remoción con respecto a los otros materiales.

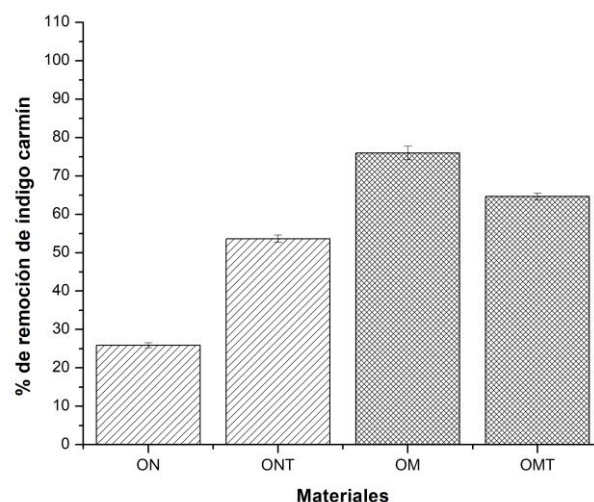


Figura 3. Porcentaje de remoción de índigo carmín.

4. CONCLUSIONES

Con el proceso de hidrólisis ácida que se le realizó al material natural se disminuye la cantidad de holocelulosa y aumenta el contenido lignina. El contenido de azúcares fue de 16.45 g/L, lo cual equivale a un rendimiento másico de 24.68 g de azúcar por cada 100 g. Los materiales evaluados (ON, ONT, OM y OMT), remueven tanto al Cr(VI) como al colorante índigo carmín en condiciones diferentes de temperatura, siendo más eficientes para el contaminante inorgánico.

Los residuos de *Zea mays* utilizados, son un potencial material adsorbente tanto de manera natural como modificada, para diversos tipos de contaminantes. El método que se utiliza para la modificación del material es un proceso donde se usan concentraciones bajas de reactivos químicos, parte de sus propuestas de mejora es reducir pasos para no generar gran cantidad de residuos y buscar alternativas para el uso de estos, sin sacrificar las propiedades adsorbentes de los materiales.

5. REFERENCIAS

- Ahmed, M.J.K., Ahmaruzzaman, M. (2016). A review on potential usage of industrial waste materials for binding heavy metal ions from aqueous solutions. *J. Water Process Eng.*, 10, 39–47.
- Aman T., Kazi, A., Sabri, M., Bano Q. (2008). Potato peels as solid waste for the removal of heavy metal copper (II) from wastewater/industrial effluent. *Colloids Surf. B*, 63(1), 116–121.
- Auge, M. (2007). Ascenso del agua freática en el Conurbano: agua fuente de vida. Consejo Superior Profesional de Geología, pp. 1-25.
- Bhatnagar A., Sillanpää, M. (2009). Applications of chitin-and chitosan-derivatives for the detoxification of water and wastewater – a short review. *Adv. Colloid Interface*, 152 (1), 26–38.
- Bhattacharjee C., Dutta S. & Saxena K. (2020). A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent. *Environmental Advances*, 2, 100007.
- Cruz, H. I., Javier, M. S., Luis, D. I., Gil, M. D. J., Pérez, A. D., & Gochi-Ponce, Y. (2017). Remoción de plomo en agua a partir de material nanoestructurado, nanotubos de carbono soportados en zeolita natural. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(2), 21-27.
- Elgarahy A., Elwakeel Z., Mohammad H., & Elshoubaky A, (2021). A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100209.
- Gómora-Hernández J. C., Carreño-De-León M. del C., Cuellar-Robles F., Álamo-Flores N. (2022). Sugar production by dilute acid hydrolysis of oat bagasse with three different acids: Kinetics and thermodynamics. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 21, IA2822.
- Miller G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical chemistry*. 31 (3).
- Morrison E., Shields M., Bianchi T., Liu Y., Newman S., Tolic N., Chu K. (2020). Multiple biomarkers highlight the importance of water column processes in treatment wetland organic matter cycling. *Water Research*, 168, 115153, 1–11.
- Láinez M., Ruiz H. A., Castro-Luna A. A., Martín-Hernández S. (2018). Release of simple sugars from lignocellulosic biomass of *Agave salmiana* leaves subject to sequential pretreatment and enzymatic saccharification. *Biomass and Bioenergy*. 118, 133-140.

Máquina regadora de fertilizante sólido de maíz

Valdés Álvarez Alejandra C.*. Meza Palacios Ramiro.**

Méndez Rivera Cain*** Hernández Sánchez Luis A. ****Calderon Jimenez Antonio.

* TECNМ Campus Ciudad Serdán, México (Tel: 245-102-5201; e-mail: avaldez@cdserdan.tecnm.mx).

** TECNМ Campus Orizaba, México (Tel: 2721754523; e-mail: Ramiro.mp@orizaba.tecnm.mx).

*** TECNМ Campus Ciudad Serdán, México (Tel: 271-145-9082; e-mail: lhernandezs@cdserdan.tecnm.mx).

**** TECNМ Campus Ciudad Serdán, México (Tel: 245-102-8336; e-mail: cmendez@cdserdan.tecnm.mx).

***** TECNМ Campus Ciudad Serdán, México (Tel: 245-146-0018; e-mail: acalderon@cdserdan.tecnm.mx).

Abstract: This project describes a machine for irrigating granulated chemical fertilizer in corn crops (milpa). It is made up of a hopper to store the fertilizer or barley seed, supported by several tires and a mechanical gear system that allows the exact same amount of fertilizer to be distributed at different speed levels. This body is assembled by a metal hopper, on which the content is stored and slides. All this will be controlled by levers to allow the direction of irrigation to whoever directs the machine, through gears of different teeth and size, as well as integrated chains to facilitate the irrigation speed. Irrigating four hectares of corn crops per working day.

Keywords: corn, machine, seeder, fertilizer, design

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha asociado la economía con la agricultura, la sociedad ha logrado un gran crecimiento gracias a su producción, pero por esta misma razón, han mejorado la calidad de vida, y el surgimiento de la agricultura fue un paso clave para el desarrollo de la humanidad.

Ante todo lo descrito anteriormente dada la necesidad de innovar y obtener mejores resultados se diseñó una máquina regadora de fertilizante sólido de maíz para la zona de Ciudad Serdán, Puebla, por la alta demanda de este producto en la zona, se desea que sea accesible para cualquier agricultor, y se busca tener la finalidad de regar abono sólido, porque de con estas características son pocas las que se encuentran en el mercado.

La máquina que se diseñó hace que facilite su trabajo y no genere cansancio en los agricultores, logrando fuentes de sustentos para los ciudadanos, una mejor alimentación creciente para la población y hacer un trabajo más ligero y relajante.

Las abonadoras son necesarias para satisfacer los altos estándares de las demandas de la población. Con la ayuda de fertilizantes se puede aumentar la cantidad de nutrientes del suelo y obtener niveles de producción muy elevados. Estas son usadas en frutales, viñedos e incluso otros tipos de cultivo. Hoy en día las abonadoras han evolucionado y algunos todavía no tienen claro qué tipos existen y cómo funciona cada una de ellas.

1. Diseño técnico de la máquina regadora de fertilizante sólido para maíz.

A continuación, se muestra el dibujo 3D que se realizó en el programa AutoCAD para identificar las partes

necesarias que la conforman y poder buscar diferentes tipos de materiales para su realización.

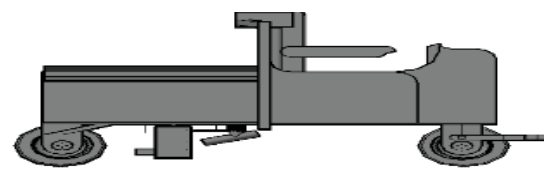


Fig. 1. Vista de planta de máquina regadora de fertilizante sólido para maíz.

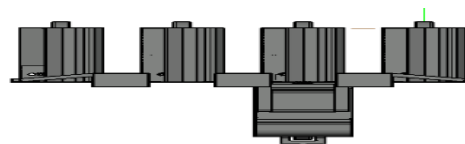


Fig. 2. Vista isométrica de máquina regadora de fertilizante sólido para maíz.

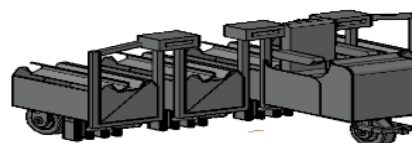


Fig. 3. Vista de perfil de máquina regadora de fertilizante sólido para maíz.

Las partes que la conforman son las siguientes:

- Lámina de acero carbón
- Lámina lisa de acero Inoxidable
- Lámina acero inoxidable 304
- Lámina de aluminio 6061 T651
- Hojas de fibra de carbono (placa)
- Hoja estándar PVC
- Hoja estándar PVC
- Tabla radiata
- Triplay de pino
- Juego de engranajes de metal
- Engranajes de metal inoxidable
- Juegos de cadenas dentadas de doble rodillo con engranes
- Barra plana de aluminio
- Tubo rectangular de aluminio
- Asiento tipo tractor

2. Análisis económico

A continuación, se describe el análisis de los materiales y costos que se realizó para determinar el precio en que cuesta producir una sola regadora de fertilizante sólido para maíz, al igual conocer cuántas máquinas se producen por día y por mes para tener en cuenta el monto total con la respectiva producción, y saber el precio de venta de cada producto fabricado.

Los costos de materia prima con un total de \$25,522 para producir una sola máquina y con un peso ligero de 227.4kg en comparación de otras máquinas, las cuales están hechas con un peso de 700kg en adelante, siendo esta máquina accesible para movilizarse en cualquier área de trabajo en el campo.

Se realizó el análisis de los costos de mano de obra de cada integrante de producción y el número de personas necesarias para la realización de una regadora de fertilizante sólido para maíz.

En la mano de obra se necesitarán 8 personas de diferentes áreas de trabajo para fabricar las máquinas abonadoras, produciendo 5 máquinas por día. Posteriormente, se analizó los gastos extras necesarios que conllevara la construcción de la máquina por día y por mes.

Tabla 1. Costos de materia prima

Puesto del personal	Núm. Del personal necesario	Días a la semana de trabajo	Sueldo por día	Sueldo al mes
Obrero de corte de lámina	1	6	300	\$8,400
Obrero de perforación con taladro	1	6	300	\$8,400
Obrero de ensamble con soldadura	1	6	300	\$8,400
Obrero de almacén y colocación de material en proceso	1	6	350	\$9,800
Operador de montacargas	1	6	250	\$7,000
Obrero de ensamble de llantas y asiento	1	6	350	\$9,800

Así mismo se realizó un análisis de los gastos indirectos de la fabricación de la máquina regadora de abono, los cuales se muestran en la tabla 2, que se muestra a continuación.

Tabla 2. Gastos indirectos de fabricación

Gastos indirectos de fabricacion		
Conceptos	Consumo por día	Consumo por mes
Energia electrica	\$ 3,000.00	\$ 84,000.00
Lubricantes	\$ 30.00	\$ 840.00
Total	\$ 3,030.00	\$ 84,840.00

En la tabla 3 se muestra el costo de fabricar una máquina, el margen de utilidad y la utilidad deseada para obtener el precio de venta, observando que cada abonadora estaría en el mercado en un precio de \$ 40,000 con una ganancia de \$13,309 por cada regadora de fertilizante sólido para maíz.

Tabla 3. Precios de venta

Precio de venta	
Concepto	Directo
Costo de producción unitario	\$ 26,618.00
Margen de utilidad	50%
Utilidad deseada	\$ 13,309.00
Costo de producción unitario	\$ 26,618.00
Precio de venta	\$ 39,927.00
Precio de venta cerrada	\$ 40,000.00

3. Evaluación mediante una encuesta la aceptación del presente proyecto por parte de la población de la región

Para poder hacer la realización de la encuesta se investigó, el número de habitantes que hay en las comunidades de Ciudad Serdán (Chalchicomula de Sesma), en el cual se observó que hay una población de 47,410 personas. Se prosiguió a obtener la muestra de la población registrada en el sistema de INEGI.

3.1 Muestra

Para poder obtener la muestra se utilizó la siguiente formula:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 N p q}{e^2 (N - 1) + Z_{\alpha}^2 p q}$$

El tipo de población que se tuvo fue una población finita, ya que el número de personas que hay en las comunidades de Ciudad Serdán es de 47,410 personas siendo así, una cantidad menor a 100, 000 habitantes.

Como resultado de muestra se obtuvo un total de 68 personas, las cuales fueron encuestadas, y así se identificó la opinión y aceptación de este proyecto a través del

tamaño de muestra obtenido de la población seleccionada.

Parametro	Valor
N	47410
Z	1.65
P	50
Q	50
e	10

Tamaño de muestra
68 Personas

N	Tamaño de la población
Z	Nivel de confianza
P	Probabilidad de que ocurra el evento
Q	Probabilidad de que no ocurra el evento
e	Error de estimación máximo

5. Resultados de la encuesta

Se presentan los resultados obtenidos de la encuesta realizada en la región de Ciudad Serdán, ya que se lograron captar 68 respuestas de las personas que siembran y abonan sus cultivos de maíz con fertilizante sólido.

- El 100% de las 68 personas que respondieron a la encuesta optaron en que si siembran maíz.
- En la siguiente pregunta el 100% contestaron en el tipo de fertilizante que aplican es el más usado en la actualidad NPK.
- Aquí el 100% de las personas encuestadas creen en que es importante la aplicación de fertilizante a las milpas en su proceso de crecimiento, ya que en estos tiempos es sumamente importante aplicar diferentes nutrientes a las plantas y a la tierra.
- El 33.8% de las personas encuestadas siembran alrededor de 6 a 10 hectáreas, el 47.1% siembran de 11 a 15 hectáreas, el 13.2% siembran de 16 hectáreas o más y el 5.9% siembran de 1 a 5 hectáreas.
- La forma en la que el 39.7% de las personas encuestadas realizan la laboral de fertilizar sus cultivos es con una regadora de mochila y manguera, con 27.9% de los encuestados abona con una fertilizadora con esparcidor, mientras que 17.6% utiliza mantera en su cuerpo y el 14.7% utiliza abonadoras para tractor, lo que implica un alto porcentaje de personas que se genere cansancio durante la jornada laboral.
- El costo que frecuentemente resulta pagar por abonar las siembras de los campesinos va desde los \$900 a \$1100 ya que el porcentaje de las personas que producen maíz es del 41.2%, mientras que 26.5% paga de \$600 a \$800 pesos, el 27.9% es de \$1200 a \$1500 y el 4.4% paga alrededor de \$300 a \$500 por hectárea.
- Este proyecto tuvo una gran aceptación en la región de Ciudad Serdán debido a la facilidad de transportar la máquina a diferentes partes lo que la hace más accesible, al igual por la implementación de sus 4 tolvas que abarcan 8 surcos de regado, haciendo que una hectárea se fertilice en 4 vueltas en cuestión de minutos en comparación a las otras formas de regado que su tiempo estimado de regado va desde 3 a 4 horas, por ello el 79.4% de los encuestados les intereso en un 100% el proyecto para poder llevarlo en la vida real,

mientras que el 20.6% tuvo un interés del 80% del producto, tomándose el resultado arriba del 80% de aceptación.

- La mayoría de los encuestados de la región optaron por que si comprarían este producto con un 80.9% de adquirir por lo menos un producto, y el 19.1% respondieron que tal vez lo comprarían.
- El 25% de los encuestados respondieron que pagarían \$50,000 por la máquina, mientras que el 23.5% pagarían \$30,000, y el 51.5% de los encuestados contestaron en que estarían dispuestos a pagar \$40,000 por la máquina, ya que con este porcentaje arriba del 50% y con el análisis económico se recomienda que este producto se venda en el mercado en \$40,000 con una ganancia del 50%, siendo así beneficio para el cliente y para el proyecto.
- Finalizando con los resultados obtenidos de esta encuesta, se presentó una pregunta a los encuestados especialmente para las personas quienes les intereso en un 80% el proyecto, que característica les gustaría que se le implementara a la máquina para que estén interesados al 100% por el producto, por ello, el 45.6% respondieron que fuera multifuncional, el 39.7% les pareció que así estaba perfecta y el 14.7 % que se le agregara más mangueras con sus respectivas tolvas para abarcar más surcos y ahorrar más tiempo para realizar más hectáreas de abonado en el maíz.

6. CONCLUSIONES

Se concluye que una abonadora es un depósito que se utiliza para el regado de abono sólido. En este depósito se introduce el fertilizante que irá destinado a cualquier tipo de planta o cultivo, en especial para los cultivos de maíz.

El abono cae por una trampilla y luego son unos discos, o un tubo giratorio, lo que se encarga de repartirlo a todo el ancho de la máquina. Suelen ser muy homogéneas y consiguen mejores anchuras de trabajo, si son abonadoras de doble disco.

Con esta máquina se logró la reducción de tiempo, gracias a las 8 salidas de distribución de abono, el tamaño de las tolvas fue ideal para la siembra de maíz, porque puede entrar fácilmente a los surcos sin necesidad de levantar la máquina en el aire y no arranca las milpas en comparación de las máquinas que necesitan un vehículo agrícola, el cual, solo puede entrar en los sembradíos cuando son de 50cm de altura, puesto que las milpas al crecer extienden sus hojas en diferentes direcciones y al colocar un peso superior de 1 tonelada hacen que la planta pierda fuerza en la tierra y se arranque o se seque.

Las regadoras de fertilizante sólido para maíz tienen una alta aceptación por las personas quienes trabajan día a día en el campo, debido a que en las comunidades que integran a la región de Ciudad Serdán, como lo son, Jesús

nazareno, Colonia La Gloria, Ahuatepec, San Francisco Cuautlancingo, San Miguel Ocotenco.

Un alto porcentaje de tierras son sembradas de maíz, y la forma habitual en la que hacen esa actividad es la tradicional, que consiste en cargar alrededor de 20 a 30 kg de abono en su cuerpo y recorrer varios metros distribuyendo el fertilizante en cantidades no exactas, por lo que un pequeño error de regado podría ocasionar que se seque la planta de maíz y muera en unas horas, después no tener los nutrientes necesarios que contienen los fertilizantes sólidos.

Un alto porcentaje de tierras son sembradas de maíz, y la forma habitual en la que hacen esa actividad es la tradicional, que consiste en cargar alrededor de 20 a 30 kg de abono en su cuerpo y recorrer varios metros distribuyendo el fertilizante en cantidades no exactas, por lo que un pequeño error de regado podría ocasionar que se seque la planta de maíz y muera en unas horas, después no tener los nutrientes necesarios que contienen los fertilizantes sólidos.

Cada regadora de fertilizante tiene la facilidad de uso, de igual forma contribuye a no generar lesiones o fatiga al obrero, ya que el sistema del mecanismo hace el trabajo en automático, debido a que los engranes giran al ritmo de velocidad que lleva la rueda de carga de la tolva para una distribución estándar y nivelada, por otra parte, cuenta con un asiento para el operador de la máquina evitando fatiga o cansancio en la jornada laboral.

Del mismo modo ayuda la prevención de enfermedades de hombros, manos, espalda, espalda baja y rodillas, dado que las jornadas de trabajo con intensas sin esta máquina. Actualmente muchas personas derivadas de las actividades del campo tienen problemas de salud significativos que derivan en la disminución de la calidad de vida de los trabajadores, por lo cual, es de suma importancia la máquina sembradora.

Con la incorporación de estantes, encargados de nivelar la altura de los tubos de salida de fertilizante, ya que en ocasiones se utiliza diferente maquinaria para la siembra de maíz dejando diferentes tamaños de bordos, los cuales hacen que se desbarranque tierra en la semilla y quede por debajo de los límites de siembra, y se seque de manera rápida, por esto se le implemento este nivelador que gira los 360° y el nivel de altura en diferentes direcciones.

El análisis económico fue imprescindible ya que con los resultados se identificó que los costos de producción son bajos haciendo que se generen ganancias hasta del 50%, los cuales, hacen que para su precio de venta sea más accesible para las personas y hacer su labor mucho más rápido. Con la encuesta realizada a las personas quienes se dedican a la siembra de maíz, se identificó que los pobladores les interesa este proyecto, y que lo adquirirían

ya que estará cerca de ellos y en poco tiempo. Logrando todo esto para poder llevar el presente proyecto a la vida real.

4 REFERENCIAS

Bohórquez, J.M., Gavilán, P y Salvatierra, B., 2008. Fertirrigación con riego localizado: un sistema en expansión. Agricultura nº 910. pag. 652-656.

ANFFE (Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes), 2009. Desarrollo del mercado de fertilizantes.

EFMA. (1997). Code of Best Agriculture. 2023, de European Fertilizer Manufacturers Association. Sitio web: <https://www.antoniotarazona.com/blog/agricultura/fertilizacion-del-maiz/> Consultado: 18 de Septiembre, 2022

Domínguez, A. (1990). El abonado de los cultivos. 20223, de Libros Mundi-Prensa. Sitio web: <https://www.kws.com/es/es/asesoramiento/gestion-del-crecimiento-de-la-planta/fertilizacion/fertilizacion-del-maiz/> Consultado: 25 de Septiembre, 2022

Fernández-Escobar, R. (2002). Los suelos y la fertilización del olivar cultivado en zonas calcáreas. 2023, de Junta de Andalucía. Sitio web: <https://www.agritotal.com/nota/plan-de-fertilizacion-en-maiz/> Consultado: 04 de Octubre, 2022

Fertiberia, S. A. (2005). Determinación, interpretación y consecuencias prácticas del análisis de suelo. 2023, de yara. Sitio web: <https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/maiz/estrategias-de-aplicacion/> Consultado: 11 de Noviembre, 2022

Domínguez, A. (1996). Fertirrigación y Agroguías. 2023, de Libros Mundi-Prensa. Sitio web: <https://www.agriaffaires.es/usado/abonadora/1/28146/su-lky-burel.html> Consultado: 28 de Noviembre, 2022

MARM. (2008). Anuario de Estadística Agroalimentaria. 2023, de Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Sitio web: <https://www.agriexpo.online/es/prod/agroservis-proizvodnja-doo/product-189250-138808.html> Consultado: 20 de Diciembre, 2022

Análisis de relación de innovación con enfoque frugal en los proyectos existentes del Tecnológico Nacional de México campus Irapuato

Luis D. Martínez González*; Carlos Montoya Nito*; Oscar J. Flores Arredondo*; Sthepanie Pérez Villanueva *

**Departamento de ingeniería en gestión empresarial; Tecnológico Nacional de México campus Irapuato; carlitocmn@gmail.com*

Resumen: Este artículo analiza el concepto de innovación frugal con el propósito de definirlo e impulsar la generación de un nuevo conocimiento. A partir de la recolección de datos referentes a los proyectos de investigación realizados en el Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus Irapuato. Se realizó una encuesta a una serie de profesores de distintos campos de estudio, donde se pretende analizar distintos aspectos que influyen en sus proyectos. También, identificamos la forma en que, en el campus, la innovación frugal podría ser utilizada en el momento de realizar un proyecto de investigación. Lo fundamental de esta investigación es contribuir en el campo de investigación de la innovación del TecNM campus Irapuato, para así incorporar un nuevo término de innovación con enfoque frugal. Del mismo modo, particularmente es conveniente continuar trabajando este campo de investigación con nuevas propuestas, ya que esta es una innovación menos explorada la cual requiere avanzar en su comprensión. La investigación se deja abierta, para la cual pretende fomentar el valor que tiene este campo de estudio y su integración en el TecNM campus Irapuato en los distintos departamentos de ingeniería.

Palabras clave: innovación, frugalidad, innovación social, innovación frugal.

1. Introducción

En el libro de “Frugal Innovation”, menciona lo siguiente acerca de lo que es innovación frugal: *“La innovación frugal, prácticamente por definición, está actuando de manera anormal para idear nuevos métodos que produzcan cambios en la sociedad. Atacan los problemas de costes y recursos, encontrando soluciones alternativas a la práctica tradicional.”* (Ratten, 2019) Con esto planteado, se puede decir que la innovación frugal es una forma de desarrollar algún tipo de mejora, creación, adaptación u evolución de algún sistema, producto o servicio con los costos y materiales bajos.

Ahora bien, la innovación frugal trata de atacar problemas reales y específicos en la sociedad, esta se ve relacionada con lo que es la innovación social, pues *“La innovación social requiere de la colaboración de gobiernos, negocios y organizaciones. El emprendedor social presta un papel fundamental como encargado de buscar soluciones a las necesidades reales de estas personas, innovando para ofrecer lo que ellas solicitan, no lo que otros consideran necesario.”* (Fundación de la innovación Bankinter, 2010).

Con la investigación de Mokter Hossain dice lo siguiente: *“la innovación frugal demuestra un*

nuevo panorama empresarial donde las pequeñas empresas con recursos limitados desarrollan innovaciones para clientes desatendidos en países de bajos ingresos. [...] también crean nuevos mercados y contribuyen a la sostenibilidad.” (Hossain, 2020). Este estudio tuvo la finalidad de explorar el proceso de como las personas conceptualizan, desarrollan y difunden sus innovaciones frugales para el éxito comercial.

En el artículo publicado por la revista FORBES México “Innovación frugal: ¿Cómo crear para los que menos tienen?” de (Granados, 2020) nos habla sobre la desigualdad en el país y la distribución de riquezas de manera irregular. El artículo presenta el enfoque de “innovación frugal” dirigido a empresas, startups y emprendedores para que innoven. De esta manera nos presentan diferentes tipos de innovaciones las cuales se encargaron de tener que sacrificar el objetivo primordial, esto se trata de usar tecnologías, materiales o procesos que disminuyen su costo y aumentan su valor para la base de la pirámide.

El TecNM es una institución tecnológica para el desarrollo educativo de futuros ingenieros y licenciados llevando diferentes estancias

educativas a lo largo de la república mexicana. El TecNM campus Irapuato es una de sus sedes que se encuentra en la zona bajo de la república mexicana y siendo el principal foco de estudio de este artículo. Los diferentes proyectos de innovación que se realizan en el TecNM campus Irapuato en las diferentes áreas de estudios, desde un sector de manufactura o de tecnologías emergentes.

2. Métodos y materiales

El enfoque metodológico para desarrollar la presente investigación está basada en el libro de “Metodología de la investigación” por Hernández Sampieri; obteniendo las siguientes características: Es exploratorio porque se indaga sobre el estado del arte y se decide tener distintas perspectivas, para así poder desarrollar el objetivo general de la investigación. Es descriptivo por el enfoque de la investigación, se referiré a que se realizó, en base a métodos estadísticos no paramétricos. No experimental pues estaremos analizando los distintos proyectos que en el TecNM campus Irapuato se tienen con referencia al área de la innovación, más no se hará ninguna modificación con respecto a las investigaciones que se estarán analizando.

La herramienta utilizada en este artículo fue una encuesta de un total de 30 preguntas, que se les aplico a una muestra de la población del TecNM campus Irapuato, únicamente a los profesores de la institución, en la que se les pedían datos generales donde se destaca la pregunta del Nivel de Madurez Tecnológico (TRL); también, con ayuda del modelo de análisis del Valor, Rareza, No sustituible/inimitable, Explotable (VRINE), el cual “es un marco que analiza los recursos disponibles a través de sus capacidades y niveles de trabajo” (Darkazanli, 2015); además que también se analiza la parte social y ambiental mediante el enfoque de la agenda 2030 y sus 17 Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS).

3. Resultados

3.1 Datos generales

Uno de los datos más importantes de analizar en la parte de los datos generales, es el nivel de TRL (Estatus de la Investigación) que se analizara en siguiente grafica.

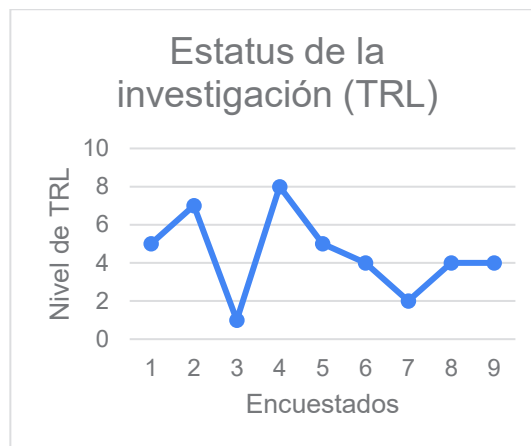


Ilustración 1. Estatus de la investigación de los proyectos del TecNM campus Irapuato

Los datos que se visualizan en la ilustración 1, fueron mixtos, esto debido a la cantidad de personas encuestados, pero la mayoría cree estar en un nivel 4 de madurez, el cual se refiere a una validación en el laboratorio, entendiéndose que dichos proyectos, aunque podrían ir a un entorno real, los investigadores no creen conveniente hacer dichas pruebas o aun no es el momento.

3.2 Valor

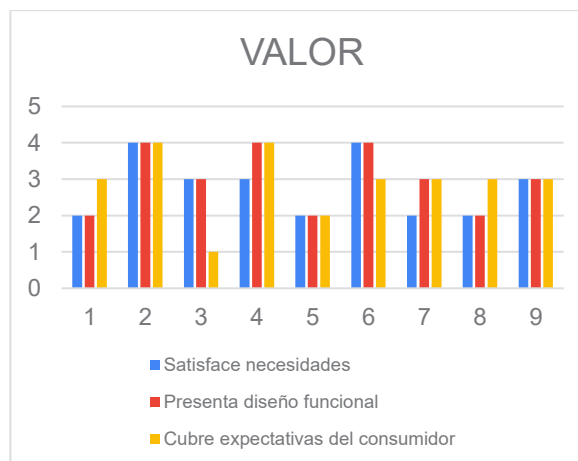


Ilustración 2. Respuestas en el reactivo del valor

En la estadística, que se muestra en la ilustración 2, los investigadores consideraron que sus proyectos tienen un valor ante el mercado, esto debido a que puede satisfacer necesidades al consumidor, presenta un diseño funcional y entendible para el consumidor final y cubre satisfactoriamente las expectativas de dichos consumidores.

3.3 Rareza

En la gráfica “la rareza de los proyectos en el TecNM campus Irapuato” (ilustración 3), los investigadores consideraron que sus proyectos causaron medianamente alguna impresión, esto posiblemente a que dichos proyectos son un producto estándar y que en algunos su estructura es igual a otras, más sin embargo consideran que son una mejora a las ya existentes. Algo a tomar importancia, es el hecho de que la mayoría considera que tiene poca demanda, y puede perjudicar al desarrollo de sus proyectos.

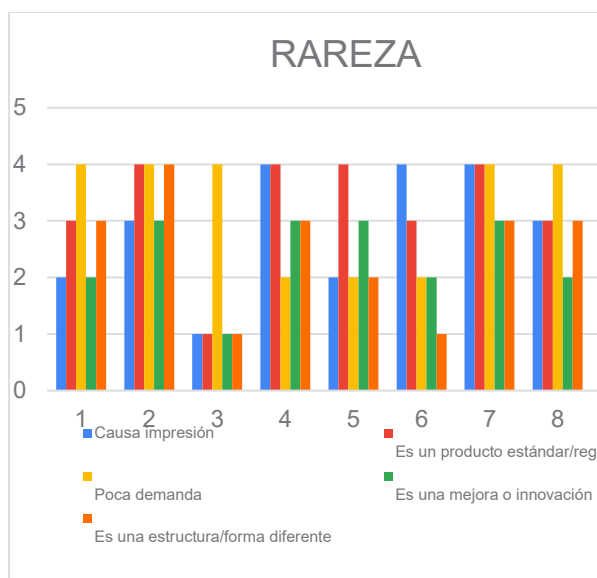


Ilustración 3. La rareza de los proyectos en el TecNM campus Irapuato

3.4 No sustituible/inimitable

Tomando en consideración la información que se encuentra en la ilustración 4, se puede decir que la mayoría de los proyectos analizados ya se encuentran o podría haber proyectos similares, es cuestionable el hecho de que muchos podrían ser imitados con facilidad, pero que aun así algunos de los encuestados creen tener partes inimitables, en otras palabras, muchos de ellos son únicamente poseen mejoras pequeñas o significativas en sus proyectos.

Un punto negativo son los reactivos que hacen referencia al registro ante las autoridades, obteniendo en su gran mayoría que no han protegidos o resguardado sus proyectos ante las autoridades correspondientes.

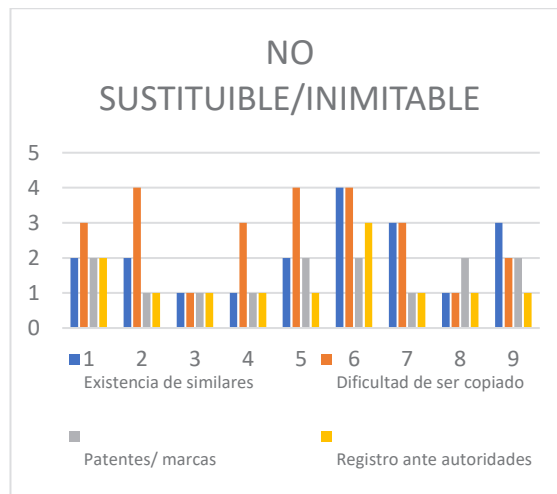


Ilustración 4. Resultados de los reactivos referentes a lo no sustituible/inimitable

3.5 Explotable

En este último punto del VRINE, se analiza si dicho proyecto podría ser explotable comercialmente, mediante los reactivos de permisos que podría contar, la aceptación por el mercado, el alcance en el mercado y su accesibilidad.



Ilustración 5. Resultados de lo explotable que tienen los proyectos en el TecNM campus Irapuato

Analizando los datos obtenidos en la ilustración 5, la gran mayoría de proyectos no cuenta con los permisos o licencias necesarias, pero tiene una aceptación en el mercado objetivo, y que mayormente tienen un alcance del mercado nacional y es accesible a la compra, y otros se encuentran en el promedio del mercado.

3.6 Social y medioambiental

Para la determinación del impacto social y ambiental de los proyectos existentes en el TecNM campus Irapuato, se empleó la agenda 2030 junto a sus 17 ODS, cada uno de estos con una meta en específico para la resolución de un problema, por lo que las opciones dentro de la encuesta tenían que ver directamente con una o varias ODS, de los diversos proyectos analizados en el estudio se profundizo en como estos ayudaban de manera directa o indirecta a un sector de la población o el medioambiente.

Los factores que se analizaron en esta parte del instrumento fueron las siguientes:

- Su proyecto contribuye con el acceso a la información.
- Su proyecto contribuye con el análisis y recolección de datos de forma sencilla.
- Su proyecto contribuye con la creación de nuevos modelos de negocios.
- Su proyecto esta relacionado con el lanzamiento de productos y servicios adaptados.
- Su proyecto esta relacionado con la creación de IA (robótica, impresión 3D, etc.)
- Su proyecto esta relacionado con la creación o desarrollo de nuevos modelos de realidad virtual.
- Su proyecto contribuye con un modelo de negocios relacionado con el financiamiento mediante plataformas digitales.

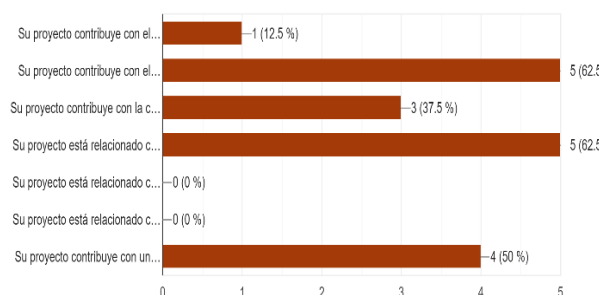


Ilustración 7. Impacto social y ambiental de los proyectos del TecNM campus Irapuato

Los resultados obtenidos fueron los siguientes, una persona considera que su proyecto contribuye con el acceso a la información, tres escogieron que sus proyectos contribuyen, ya sea de manera directa o indirecta a la creación de nuevos

modelos de negocios; también algunos consideran que su proyecto está relacionado con un modelo de negocios relacionado con el financiamiento. Y dos de estos enfoques fueron igual de importantes, pues muchos consideraron que su proyecto contribuye con el análisis y recolección de datos y/o está relacionado con el lanzamiento de productos y servicios adaptados.

Con todo esto dicho podemos decir que ciertos proyectos si consideran que es importante el uso de los ODS o el conocimiento de ellas para el desarrollo de su proyecto o innovación.

4. Conclusiones

En el presente artículo se profundizo en la comprensión de los diversos factores que introducen en el concepto de innovación frugal. Sin embargo, se ha analizado que en el TecNM campus Irapuato se desconoce el término innovación frugal, por parte de los distintos departamentos que conforman el campus siendo este un factor a considerar ya que la frugalidad puede presentar un cambio al momento de realizar algún proyecto o investigación.

Por lo que podemos decir es que se tiene conocimientos de la utilización de recursos de manera más amigable con el medio ambiente y siempre analizando la situación ambiental con la que se esté relacionando el proyecto. En referente a la innovación frugal y los proyectos del TecNM campus Irapuato si contienen una vaga o pequeña relación, debido a que siguen cierta moralidad ante estas situaciones medioambientales y sociales.

5. Bibliografía

- Ahmad Bhatti, Y. (2012). What is frugal, what is innovation? Towards a theory of frugal innovation. *SSRN*. Obtenido de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2005910
- Daerkazanli, W. (2015). VRINE Model. *SBS Swiss Business Schol.*
- Darkazanli, W. (2015). VRINE Model. *SBS Swiss Business School.*

Fundación de la innovación Bankinter .
(2010). *El arte de innovar y
emprender: cuando las ideas se
convierten en riqueza*. España:
Bankinter.

Granados, C. (2020). Innovación frugal:
¿Cómo crear para los que menos
tienen? *FORBES México*.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado,
C., & Baptista Lucio, P. (2014).
Metodología de la investigación
(Sexta ed.). México, D.F.: McGraw-
Hill Education.

Hossain, M. (2020). Frugal innovation:
conception, development, diffusion
and outcome. *Journal of Cleaner
Production*.

Naciones Unidas . (2018). *La agenda 2030 y
los objetivos de desarrollo sostenible:
una oportunidad para América
Latina y el Caribe*. Santiago.

Ratten, V. (2019). *Innovación frugal*. Estados
Unidos de América: Routledge.

Red Latinoamericana de Innovación Frugal.
(s.f.). *Red Latinoamericana de
Innovación Frugal*. Obtenido de Red
Latinoamericana de Innovación
Frugal:
<https://redinnovacionfrugal.lat/#seccionFru>

Diseño de un prototipo generador de briquetas

Luis. A. Hernández* Alejandra C. Valdes**
Caín Méndez*** Antonio Calderón****

* *TECNM Campus Ciudad Serdán*
México (Tel: 271-145-9082; e-mail: lhernandezs@cdserdan.tecnm.mx).
** *TECNM Campus Ciudad Serdán*
México (Tel: 245-102-5201; e-mail: avaldez@cdserdan.tecnm.mx).
*** *TECNM Campus Ciudad Serdán*
México (Tel: 245-102-8336; e-mail: cmendez@cdserdan.tecnm.mx).
**** *TECNM Campus Ciudad Serdán*
México (Tel: 245-146-0018; e-mail: acalderon@cdserdan.tecnm.mx).

Resumen: El presente proyecto consiste en el diseño de una máquina que generara briquetas por medio de residuos (biomasa sólida) a base de materia orgánica, esto con el fin de dar un uso y/o aprovechamiento de estos, dando prioridad al cuidado ecológico. Dentro de la región de Ciudad Serdán se desarrollan diferentes actividades que generan residuos como el aserrín, leña, zacate, cartón etc. El diseño del equipo está conformado por una tolva, recolecta la materia orgánica o inorgánica que se le añade, la procesa, compacta y secciona, lo que se obtendrá es una briketa que tiene un mayor índice calórico, emite menos contaminantes al momento de quemarlo y es 100% natural y amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: Briketa, contaminación, dioxina, máquina diseño.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el impacto ambiental se ha visto afectado por diversos factores, uno de los principales causantes de daños ambientales se encuentra dentro del marco energético, la mayoría de las industrias generan su propia energía para sus procesos mediante calderas, de igual manera existen hornos industriales, los cuales utilizan carbón o materiales parecidos al mismo para que funcionen adecuadamente. Algunas de estas empresas ya utilizan briquetas para la misma función, otras no cuentan con esta maquinaria, por su precio elevado. En la región de ciudad Serdán se desarrollan diferentes actividades que generan residuos como algunos ejemplos: hojas secas, aserrín, bambú, leña, cascara de semillas, frutos secos, maíz, madera, residuos ganaderos, zacate, papel, cartón, etc., esta será utilizada para generar un producto en beneficio del cuidado del medio ambiente. Se realiza un análisis de las características generales de la máquina generadora de briquetas y otro económico, para saber el capital de inversión necesario que se hará para construir la misma.

2. FORMATO

2.1 Características generales

Los diseños que se manejan tienen deficiencias entre los rodillos mecánicos, los cuales realizarán la mezcla para después

compactar el producto, esta mezcla homogénea a veces no llega a ser la correcta. Otras no generan el triturado adecuado para la formación de la briketa. Algunas otras máquinas utilizan leña, por ello se han creado graves problemas ambientales por la disminución de la capa boscosa y aumento de las enfermedades respiratorias, esto se debe a los ineficientes procesos de combustión, ya que estas liberan compuestos tóxicos como dioxinas, monóxido de carbono, dióxidos de nitrógeno y dióxido de azufre que afectan especialmente a niños y población adulta de las zonas rurales.

3. MATERIAS Y MÉTODOS

Se diseñó la maquinaria en base a las necesidades del consumidor, además de que se pueda diseñar a menor costo. A continuación, se presenta el nuevo diseño de la máquina generadora de briquetas, siendo este solo un diseño ya que debido a factores como la contingencia que actualmente se prevalece en la región, no se logró llevar a cabo su elaboración. La tabla muestra los costos actuales que se tendrán que realizar para la construcción de la nueva máquina generadora de briquetas.

Tabla 1. Materiales

Material	Unidad de medida	Cantidad empleada
Lamina de acero galvanizado	m	2 pzas

ptr 1 x 1plg	m	4 pzas de 6 m
Chumaceras de 1 pulgada	pulg	1 pza
Motor de 3 hp	hp	1 pza
Flecha de 10 pulgadas (fierro)	m	6 m
Flecha de 3/8 y 1/2 pulgadas (fierro)	m	1 m
Piñones de 14 dientes		4 pzas
Cadena		2 pzas
Retenes de 1 pulgada	pulg	6 pzas
Soldadura 6013	kg	5K

4. DISEÑO FINAL DE LA MÁQUINA



Fig. 1. Diseño final de la máquina generadora de briquetas.

4. ANÁLISIS DE COSTOS

El primer paso es determinar el costo de los materiales a utilizar para armar el prototipo a escala real.

Tabla 2. Costo de materiales

Material	Unidad de medida	Cantidad empleada	Costo unitario	Costo Total
Lamina de acero galvanizado	m	1	\$648.50	\$648.50
ptr ½ X ½	m	2 piezas de 6m	\$170.00	\$340.00
Chumaceras de 1 pulgada	pulg	6	\$70.00	\$420.00
Motor de 1/2 hp	hp	1	\$1,692.00	\$1692.00
Flecha de 2 pulgadas (fierro)	m	1 metro	\$180.00	\$180.00
Buril de tungsteno		1	\$650.00	\$650.00
Piñones de 14 dientes		4	\$100.00	\$400.00
Cadena		2	\$58.00	\$118.00
Retenes de 1 pulgada	pulg	6	\$80.00	\$480.00
Soldadura 6013	kg	1K	\$50.40.00	\$50.40
Total de costos de material =				\$4978.9

El segundo paso es determinar los gastos de mano de obra, así como otros gastos que involucran la realización de la maquina briquetadora.

Tabla 3. Costo de mano de obra

Mano de obra	Personas requeridas	Pago por día	Días contr.	Pago total
Soldador	1	\$ 250.00	4	\$ 1,000.00
Electricista	1	\$ 380.00	1	\$ 380.00
Total				\$ 1,380.00

Tabla 4. Concentrado

Material	\$ 4,978.90
Mano de Obra	\$ 1,380.00
Otros gastos	\$ 350.00
Otros gastos	\$ 350.00
Precio total de venta	\$ 6,708.90

Por último, se determinó el costo total de la maquina a tamaño real para la fabricación de briquetas ecológicas, dando un resultado mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 5. Gastos totales de la máquina

Fabricación	\$ 6,708.90
Mantenimiento	\$ 900.00
Total	\$ 7,608.90

5. CONCLUSIONES

Las ventajas que ofrece la briquetadora son: energía limpia, fuente renovable, materia orgánica no tóxica y natural, esto reduce las emisiones atmosféricas considerablemente en comparación con el carbon. Algunas de las desventajas y limitaciones son el consumo de energía, la variación de parámetros y el aumento de temperatura.

6. REFERENCIAS

- [1] Amigo Borgeau P. A. y Villarroel Gallardo G. I., “Estudio de prefactibilidad para la implementación de una planta briquetadora en el aserradero de la empresa Salfa de Puntas Arena.”, Chile, 2011.
- [2] Chub Caal B. E., “Evaluación de la combustion de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín de pino (*Pinus maximinoi*).”, Alta Verapaz, Guatemala, 2017.
- [3] Quiles A. I., “Diseño de modelo de máquina para producción de briquetas de huesos de aceituna.”, San Rafael Mendoza, 2017.

Medición de temperatura en tuberías de distribución de agua con tecnología óptica

R.A. Nájera-Courtois. J.L. Camas-Anzueto. J. Gómez-Pérez.
R. Grajales-Coutiño. G.F. Pérez-García. P.M. Velasco-Bolom.

*Tecnológico Nacional de México/IT de Tuxtla Gutiérrez, Grupo de Investigación Optomecatrónica,
Posgrado, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.*

Resumen: La medición de temperatura en tuberías de distribución de agua es de suma importancia debido a su estrecha relación con el cambio de las propiedades de los fluidos. Actualmente la medición de temperatura se realiza utilizando sensores metálicos que proporcionan mediciones confiables al implementarse en redes de tuberías. Sin embargo, al someter este tipo de sensores al contacto con fluidos presentan un deterioro progresivo, afectando directamente a la fiabilidad de las mediciones que realizan. Para resolver este inconveniente se crea la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías de medición, que no requieran de componentes metálicos como material sensitivo. En este trabajo se presentan resultados preliminares de un sistema de medición de temperatura en tuberías. Este sistema incluye un sensor de fibra óptica que utiliza material termocrómico.

Keywords: optical fiber temperature sensor, multimode fiber (MMF), thermochromic material, temperature measurement in pipelines, temperature measurement devices.

1. INTRODUCCIÓN

En la distribución de agua en tuberías es importante el monitoreo de la temperatura [Wols, B. and Van Thienen, P. 2016], debido a que a altas temperaturas existe vaporización, formando burbujas de vapor, que implosionan en forma de micro-chorros (presión) contra zonas puntuales en la pared de la tubería, provocando desgaste interno o colisión total [Milone, V. 2012]. La distribución de temperatura alrededor de las tuberías juega un papel importante tanto al enfriarse, como al calentarse y esto afecta a la tubería [Széplaky, D. et.al. 2013].

El aumento o disminución de la viscosidad de un fluido es afectada por diversas variables, siendo la temperatura una de las más importantes, tomando en cuenta que, al aumentar la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a una disminución de la viscosidad [Talens, P. et.al. 2022].

Si la temperatura cambia repentinamente es posible que la tubería sufra daño irreversible. Por esta razón se han reportado trabajos en los que se ha iniciado la investigación de un sistema de monitoreo a través de la medición de temperatura, y demostraron que es un parámetro indicativo para prevenir daños intrínsecos en la tubería, [Niklès, M. et.al. 2004].

Es importante resaltar que cuando una tubería se encuentra inmersa en temperaturas extremas, es posible exponerse a fenómenos internos que ocasionan daño, como solidificación cuando la temperatura es baja; ocasionando una expansión y generando presión interna en la tubería, llevando a la ruptura del ducto [Podorozhnikov, S. et.al. 2018], y los cambios drásticos de temperatura en tiempos cortos crean corrosión que aumenta el daño sobre las paredes de la tubería [Okonkwo, P. et.al. 2015 y Benamor, A. et.al. 2018].

Se han reportado fenómenos biológicos o ambientales relacionados con la temperatura, creando la necesidad de mantener en un rango estable de operación, evitando generar microfauna no deseada [McNeill, L. et.al. 2001 y Okonkwo, p. 2017]. Considerando estos fenómenos en torno a la temperatura es necesario el monitoreo constante con sensores robustos que provean precisión y exactitud en la medición en medios extremos [McNeill, L. y Edwards, M. 2002].

Existen diferentes configuraciones de fibras ópticas, entre las más comunes para el censado de temperatura, se encuentran las rejillas de Bragg y las de periodo largo [Arushi, A. 2018 y Xuekai, G. 2020], aunque sus características de medición son excelentes, su manufactura requiere la utilización de equipo especial. Otro tipo de configuración reportada son los sensores de fibra estructurada [Arijit, D. y Ardhendu, S. 2020], que simplifican el proceso de fabricación al utilizar empalmes entre secciones de fibra [Monomodo-multimodo-monomodo], dónde

la parte central será fibra multimodo común [Noor, S. et.al. 2019 y Aguilar, S. et.al. 2011], o fibra multimodo especial (No-Core), [Yong, Z. et.al. 2020].

Modificando la estructura básica de estos sensores es posible mejorar sus características de medición, al introducir pequeños desplazamientos sobre uno de los extremos de la fibra no-Core [Xia, H. et.al. 2015] que permite la medición de temperaturas hasta 270 °C o la generación de un adelgazamiento en la parte central de la estructura [Lin, M. et.al. 2015], permitiendo conseguir una sensibilidad alrededor de 38.7 pm/°C.

En el tecnológico nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez se han desarrollado investigaciones relacionadas con diferentes sensores de fibra óptica para la medición de propiedades físicas y químicas de diversas sustancias y fenómenos. Particularmente se ha llevado a cabo el desarrollo de un sensor de temperatura de fibra óptica utilizando un material termocrómico, demostrando que al utilizar la longitud de onda de absorción de la lofina se incrementó la sensibilidad en -0.028 dB/°C [Pérez, et.al. 2022]. En un trabajo previo realizado por los mismos autores se reportó que utilizando una configuración estructurada de fibra no-Core revestida con lofina se incrementa la sensibilidad en la medición en -0.08895 dB/°C, [Pérez, et.al. 2021].

La realización del diseño propuesto en la división de estudios de posgrado del tecnológico nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, permitirá la medición de temperatura mediante una implementación sencilla en cualquier tubería de distribución, garantizando que la sensibilidad del sensor de fibra óptica se mantenga constante proporcionando mediciones confiables y precisas, permitiendo conocer las condiciones internas de los fluidos.

2. DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

Se realizó la construcción de una sección de tubería que utiliza el sistema optoelectrónico de adquisición de señal de luz y el sensor de temperatura de fibra óptica; diseñando cada uno de los componentes que integran el acoplador de tubería que incluye el sensor de medición de temperatura. El diseño consiste en dos secciones (frontal y posterior). En la sección frontal se ubica una placa de transmisión térmica, con la función de transferir la temperatura del agua hacia el sensor de fibra óptica.

La sección posterior que completa al acoplador se encuentra en forma de brida. Ambos componentes cuentan con dos secciones (superior e inferior) que facilitan la correcta fijación. Se diseñó un marco de fijación para sujetar de forma segura a la placa de medición de temperatura y al sensor de fibra óptica. Posteriormente con el objetivo de resguardar los componentes, se diseñó una tapa que cuenta con una rejilla, que disipa el calor interno proveniente de los componentes optoelectrónicos. La Fig. 1 presenta el ensamble de los componentes del acoplador de medición de temperatura.

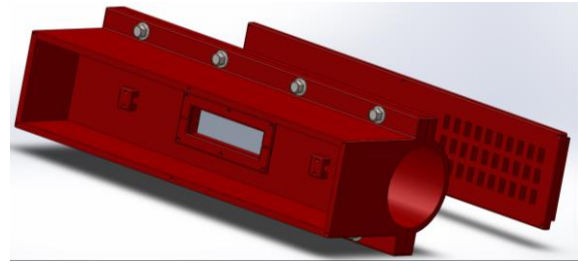


Fig. 1. Diseño previo del acoplador de medición de temperatura

En la construcción del dispositivo, se empleó una impresora ultimaker S5, utilizando filamento PLA con un 70% de relleno; obteniendo, como resultado el modelo físico del acoplador para sus posteriores pruebas de funcionamiento. En la Fig. 2 se presenta la sección de tubería de forma física para la visualización de los componentes del dispositivo.

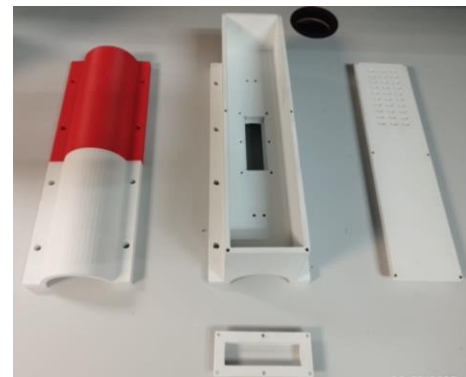


Fig. 2. Prototipo físico del dispositivo impreso en 3D

3. RESULTADOS

El sensor de fibra óptica no tendrá contacto con el agua, por esta razón se requiere implementar un material que ofrezca una transferencia de energía calorífica sin pérdidas, y que la temperatura del agua se transfiera al sensor de fibra óptica de forma eficiente. Permitiendo, la caracterización del material transmisor de energía térmica, con el objetivo de seleccionar al de mejores características de transmisión de temperatura del fluido localizado en el interior de la tubería.

En la investigación teórica para la selección de los materiales que permiten la transferencia de energía térmica con la menor pérdida, se llegó a seleccionar aluminio, cobre y plata. En la tabla 1 se identifican las especificaciones técnicas de los materiales seleccionados.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los materiales seleccionados

Material	Espesor (mm)	Dimensiones (mm)	Coefficiente de transferencia térmica
Aluminio	0.6	75 x 25.5	205 W/mK
Cobre	0.6	75 x 25.5	385 W/mK
Plata	0.1	75 x 25.5	406 W/mK

En la caracterización se utilizaron dos sensores de temperatura TH100PT de la marca THORLABS con una resistencia de 100 ohms, dos multímetros MUT-105 de la marca TRUPER, una estación de soldadura de la marca GOXAWEE de 750 W, suministrando aire caliente mediante un soplador de aire, con rango de temperatura de 100 a 480 °C, y una prensa de 1” de la marca TRUPER.

Para la caracterización de cada una de las placas seleccionadas previamente se procedió a fijar los sensores TH100PT a la misma altura de la placa, uno del lado A y otro al lado B. Posteriormente se fijaron las placas utilizando la prensa para asegurar que se mantuviera en posición vertical. La Fig. 3 presenta el acomodo de los componentes para las mediciones de transferencia de temperatura de las placas.

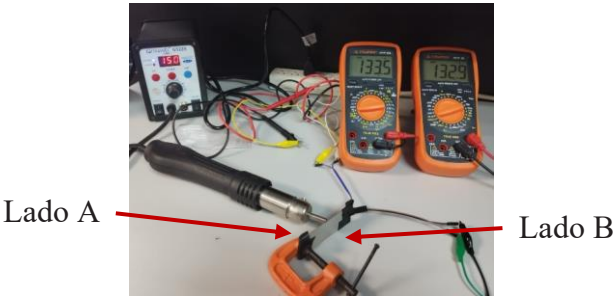


Fig. 3. Acomodamiento de los componentes para la caracterización de las placas

Después de 2 minutos se tomó lectura de las resistencias que se obtuvo de ambos sensores, se continuó elevando la temperatura apoyada con el soplador de aire caliente. En la Fig. 4 se identifica el comportamiento de la transferencia de temperatura de las placas de aluminio, cobre y plata. Observando que el comportamiento de los materiales es no lineal y existe una diferencia de temperatura entre los lados A y B de los materiales, identificando que la placa de aluminio es la que presenta menor variación.

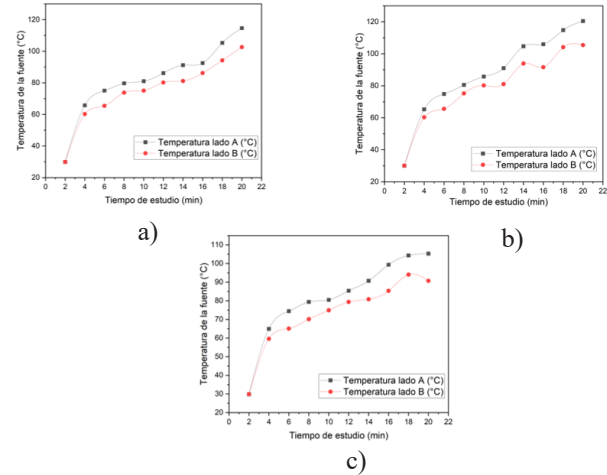


Fig. 4. Comportamiento de la transferencia de temperatura: a) placa de aluminio, b) placa de cobre, c) placa de plata

3.1 Construcción del sensor de fibra óptica

Comenzando con la construcción del sensor de fibra óptica se recortó 30 cm de fibra óptica multimodo GIF625-100. A esta sección se le retiró 1 cm de recubrimiento en la parte central. Posteriormente se realizó un ataque químico a la sección de 1 cm utilizando ácido fluorhídrico 48-51% de la marca MEYER durante 31 minutos, adelgazando la capa de fibra óptica. El siguiente paso consiste en preparar el compuesto químico de lofina con las propiedades requeridas, el compuesto contiene 80 mg de PVC, 60 mg de lofina, 160 µl de tributilfosfato y 2 ml de tetrahidrofurano. Estos componentes se depositaron en un tubo de ensayo, mezclando de forma uniforme, con ayuda de la pipeta se agregó el compuesto de lofina sobre la fibra óptica y la placa de aluminio, para medir la temperatura de los fluidos: agua, aceite, comestibles, entre otros. En la Fig. 5 se presenta el compuesto de la lofina sobre la fibra óptica y la placa de aluminio.



Fig. 5. Compuesto de lofina sobre la fibra óptica y la placa de aluminio

3.2 Caracterización del sensor

Se propuso un diseño experimental en el laboratorio de optomecatrónica del tecnológico nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, para simular las condiciones de funcionamiento del sensor, utilizando una fuente led para fibra óptica M365FP1 con una longitud de onda de 365 nm de la marca THORLABS como fuente de luz, un medidor de potencia portátil PM100D de la marca THORLABS que se encarga de realizar las mediciones de potencia conforme la temperatura aumenta, una parrilla de calentamiento ajustable de la marca FOURE'S que permite ajustar la temperatura requerida, un recipiente de aluminio que contiene agua e incluye una ranura en la tapa superior donde se encuentra adherido el sensor propuesto.

Se procedió con la caracterización a una temperatura ambiente de 25 °C, utilizando 3.75 V y 1.4 A para alimentar a la fuente de luz de 365 nm. El experimento se realizó bajo las condiciones de incremento de la temperatura 5 °C cada 5 minutos durante 1 hora con 15 minutos. En la Fig. 6 se observa gráficamente el comportamiento del sensor de temperatura, disminuyendo la potencia 0.0001 (μW) con el aumento de la temperatura. A partir de 75 °C el sensor deja de mantener su comportamiento y comienza a incrementar su potencia exponencialmente, esto indica que el rango de operación del sensor será de 25 a 75 °C.

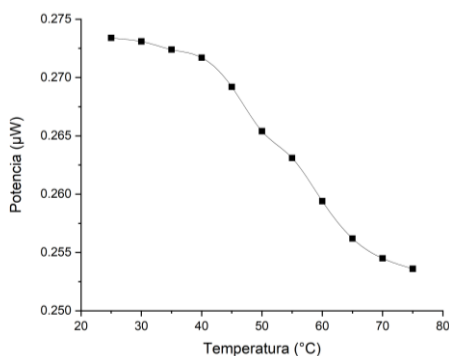


Fig. 6. Comportamiento del sensor de temperatura

4. CONCLUSIÓN

El diseño propuesto del dispositivo modular permite ser implementado en distintos tipos de tubería, adecuándose a las condiciones de operación requeridas para la aplicación que requiera ser destinado. La placa de transmisión térmica implementada cumple de manera satisfactoria con su función, permitiendo al sensor diseñado detectar la temperatura del agua, para realizar la medición manteniéndolo libre del contacto con el fluido.

La caracterización realizada de los materiales seleccionados que se observan en la tabla 1, permitió seleccionar la placa de aluminio, en la Fig 4a se identifica el comportamiento de la placa de aluminio, representando la temperatura del lado A de color azul, y la temperatura del lado B de color rojo. A partir de los 60

°C comienza a incrementarse paralelamente la temperatura del lado A y el lado B, manteniendo un comportamiento constante, acercándose entre sí a los 90 °C, presentando el mejor comportamiento de transmisión térmica entre los materiales de la prueba.

La caracterización del sensor de temperatura de fibra óptica propuesto nos permitió determinar el rango de operación para mantener al sensor en condiciones de funcionamiento óptimas, y los valores de potencia que se obtienen cuando el sensor es sometido a diferentes temperaturas, para su posterior interpretación en aplicaciones industriales.

REFERENCIAS

- [1] Aguilar Soto, A. L. (2011). Fiber optic temperature sensor based on multimode interference effects. *Journal of Physics, Conference Series*. 012011.
- [2] Arushi, A. (2018). "High-resolution slow-light fiber Bragg grating temperature sensor with phase-sensitive detection." ("Sci-Hub | High-resolution slow-light fiber Bragg grating temperature ...") *Optics letters*, 43(14), 3337-3340.
- [3] Benamor, A. T. (2018). "Effect of temperature and fluid speed on the corrosion behavior of carbon steel pipeline in qatari oilfield produced water." ("Effect of temperature and fluid speed on the corrosion behavior of ...") *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 808, 218–227.
- [4] Datta Arijit, S. A. (2020). Realization of a highly sensitive multimode interference effect-based fiber-optic temperature sensor by radiating with a Vortex beam. ("Realization of a highly sensitive multimode interference effect-based ...") *Optik Optics*, 218, a.165006.
- [5] Gao, X. (2020). "A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing." ("A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg ...") *Optics Communications*, 454, a.124441.
- [6] Hao Xia, h. T. (2015). A fiber laser temperature sensor based on SMF core-offset structure. ("A fiber laser temperature sensor based on SMF core ... - ResearchGate") *Optics Communications*, 335, 78-81.
- [7] Ma, L. Z. (2015). Fiber-optic temperature sensor based on a thinner no-core fiber. *Optik*, 126(9-10), 1044-1046.
- [8] McNeill, L. S. (2001). Iron pipe corrosion in distribution systems. *Journal-American Water Works Association*, 93(7), 88-100.
- [9] McNeill, L. S. (2002). The importance of temperature in assessing iron pipe corrosion in water distribution systems. *Environmental monitoring and assessment*, 77(3), 229–242.

- [10] Milone, V. (2012). The effect of temperature and material on mains pipe breaks in gothenburg. *Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden*, 74.
- [11] Niklès, M. V. (2004). Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring. *Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, 5384, 18–25.
- [12] Noor S, H. W. (2019). Multimode interference-based fiber-optic sensor for temperature measurement. *Journal of Physics*, Conference Series 012023.
- [13] Okonkwo Paul, C. A. (2015). Effect of temperature on the corrosion behavior of API x80 steel pipeline. ("Effect of Temperature on the Corrosion Behavior of API X80 Steel Pipeline") *Int. J. Electrochem. Sci*, 10, a. 10246–10260.
- [14] Okonkwo, P. C. (2017). "Effect of temperature on the corrosion behavior of API X120 pipeline steel in H₂S environment." ("Effect of temperature and fluid speed on the corrosion behavior of...") *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(8), a.3775-3783.
- [15] Pau Talens Oliag, V. C. (2022). Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de un alimento fluido. ("Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de un alimento ...") *Universitat Politècnica de València*, 2-5.
- [16] Pérez García G.F, C. A. (2021). Fiber-optic temperature sensor using a no-core fiber structure configuration coated with thermochromic materia. ("Fiber-optic temperature sensor using a no-core fiber structure ...") *Optical Engineering*, 60(11), a.117107.
- [17] Pérez García G.F, C. A. (2022). "Demonstration of improving the sensitivity of a fiber optic temperature sensor using the wavelength of maximum absorption of the lophine." ("Demonstration of improving the sensitivity of a fiber optic temperature ...") *Measurement*, 187, a.110378.
- [18] Podorozhnikov, S. M. (2018). Thermal interaction of underground pipeline with freezing heaving soil. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 357(a. 012011).
- [19] Széplaky, D. V. (2013). "Effect of temperature distribution around pipelines for transportation of natural gas on environment." ("EFFECT OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AROUND PIPELINES FOR TRANSPORTATION ...") *The holistic approach to environment*, 3(1), 33–40.
- [20] Wols, B. a. (2016). Impact of climate on pipe failure: predictions of failures for drinking water distribution systems. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 16(1), 240-253.
- [21] Yong, Z., & Zhao Jian, Z. Q. (2020). "High sensitivity seawater temperature sensor based on no-core optical fiber." ("High sensitivity fiber-optic temperature sensor based on PDMS glue ...") *Optical Fiber Technology*, 54, a.102115.

Análisis de los sensores distribuidos de fibra óptica con la técnica OTDR aplicados al Monitoreo de Salud Estructural para propuesta de sensor de desplazamiento

Luis Enrique Guillen Ruiz *, Jorge Luis Camas-Anzueto *, Carlos Alberto Hernández Gutiérrez*,
Madain Pérez Patricio*, Rubén Grajales Coutiño*

Gerardo León Lizárraga*,

* Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez. Carretera
Panamericana Km. 1080. C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
(México).

Corresponding author: imcguillen@live.com.mx

Abstract: Los desplazamientos entre los tableros de los puentes de concreto son un factor importante a considerar durante el diseño, construcción, inspección y mantenimiento de los puentes. La atención adecuada a estos factores puede garantizar la seguridad y la integridad a largo plazo de los puentes y asegurar el flujo seguro y eficiente del tráfico vehicular y peatonal. Para esto los sensores distribuidos de fibra óptica que utilizan la retrodispersión de Rayleigh presentan ventajas con respecto a los sensores tradicionales. Una de las ventajas principales es cuando se utiliza un transductor adecuado y se implementan en el monitoreo de multipuntos en puentes de concreto. Este artículo presenta un estudio relacionado con los sensores utilizados en el monitoreo de salud estructural. Se presentan el principio de funcionamiento de los sensores distribuidos de fibra óptica y un análisis de la técnica reflectometría óptica en el dominio del tiempo. Se muestra la recopilación de los últimos trabajos que han utilizados sensores distribuidos de fibra óptica con la técnica de Reflectometría óptica en el dominio del tiempo para analizar cual opción es la mejor para implementarse en nuestro sensor. Se realiza una propuesta de sensores distribuidos de fibra óptica tomando como base los elementos estudiados en la recopilación. Finalmente se muestran los puntos clave de los trabajos y como se pueden implementar en nuestro sensor para indicar que se requiere incluir en trabajos futuros.

Keywords: Fibra óptica, Macrocurvatura, Retrodispersión de Rayleigh, DFOS, OTDR.

1. INTRODUCCIÓN

El Monitoreo de salud estructural (Structural Health Monitoring, SHM) ha sido relevante en los últimos años porque se encarga de monitorear las condiciones y el comportamiento de manera continua de las estructuras civiles importantes. Tiene como finalidad prevenir fallos catastróficos y reparaciones costosas al permitir la detección temprana de problemas y la implementación de medidas preventivas.

Los puentes son estructuras importantes porque se construyen para salvar accidentes geográficos como barrancos o ríos y conectar dos lados permitiendo el tránsito de personas, vehículos, animales o bienes, favoreciendo el ámbito económico y social porque se ahorra tiempo y dinero en el transporte.

Sin embargo, existe un deterioro constante de los puentes de concreto debido a los huracanes, los deslizamientos de tierra, los sismos o el paso de tiempo. Para asegurarse el funcionamiento seguro del uso de los puentes se debe monitorear factores como las cargas de tráfico, la temperatura, la humedad, la vibración o el desplazamiento. Cuando no hay un monitoreo adecuado en los puentes de concreto se producen fallas con reparaciones más costosas y difíciles de atender.

El desplazamiento es uno de los parámetros más importantes que se deben monitorear en los puentes de concreto porque es un material rígido y menos resistentes que puede presentar fisuras o grietas en su superficie o en su interior. El monitoreo del desplazamiento ayuda detectar estas fisuras y grietas midiendo las pequeñas variaciones en la posición de los elementos del puente. Además, el desplazamiento es útil para evaluar la deformación o el asentamiento del terreno sobre el que se encuentra el puente que afecta la estabilidad y la integridad del mismo.

Se han utilizado diversos sensores para monitorear el desplazamiento en puentes de concreto, destacando la fibra óptica. Dentro de la clasificación de los sensores de fibra óptica utilizado en el SHM se encuentran los sensores distribuidos de fibra óptica (Distributed fiber optic sensor, DFOS) cuya característica más importante es realizar mediciones en varios puntos con la misma fibra óptica (Wijaya et al., 2021). Estos sensores tienen como principio la retrodispersión de la luz (Rayleigh, Brillouin y Raman), que en el SHM se analizan con cinco técnicas desarrolladas para ello.

En este trabajo se presenta un análisis histórico de los sensores distribuidos de fibra óptica que se han utilizado para medir desplazamientos en el SHM con la técnica de Reflectometría óptica en el dominio del tiempo (Optical time domain

reflectometry, OTDR). En la sección 2 se realiza una revisión de las desventajas de los sensores que miden desplazamientos en el SHM, mostrando las ventajas que tienen los SFOD. Se muestra el principio de trabajo de los DFOS y las ventajas de trabajar con la retrodispersión de Rayleigh para medir desplazamientos en puentes de concreto. En la sección 3 Se muestra las ventajas de trabajar con la técnica OTDR y se realiza una revisión de investigaciones y publicaciones relacionadas con el uso de esta técnica para medir desplazamientos. Se muestra una propuesta de trabajo para realizar mediciones de desplazamientos en las aberturas de los tableros de los puentes de concreto con un DFOS basado en OTDR y en la sección 4 se describen las conclusiones y trabajos a futuro relacionados.

2. SENSORES UTILIZADOS EN EL SHM

2.1 Sensores generales que miden desplazamiento en el SHM

El SHM utiliza para medir desplazamientos sensores del tipo visión por computadora, GPS, láser, galgas extensiométricas, acelerómetros, giroscopios y fibras ópticas. Cada uno de estos tiene ventajas, pero presentan limitaciones. A continuación, se muestra las desventajas encontradas en estos sensores:

Visión por computadora: En este tipo de sensores se presenta baja precisión por sensibilidad a la iluminación, necesidad de una línea de visión clara, influencia en la textura del concreto por humedad, problemas de calibración, interferencias a las condiciones ambientales y la necesidad de una línea de visión clara (Dong & Catbas, 2021; Kromanis & Kripakaran, 2021).

GPS: Las limitaciones de estos sensores son una precisión limitada en áreas urbanas densas, un consumo de energía elevado, influencia por la humedad, dificultad para fijar los sensores, limitaciones en la cobertura, sensibilidad a las condiciones climáticas y problemas de interferencias (Guzman-Acevedo et al., 2019; Wang et al., 2021).

Láseres: En este tipo de sensores la precisión se afecta por las superficies no uniformes, cuando hay problemas de alineación, deben tener un mantenimiento regular, requieren una línea de visión clara, Problemas de reflexión, dificultad para medir desplazamientos en superficies oscuras o reflectantes y tienen sensibilidad a la interferencia ambiental y a las condiciones climáticas (Nasimi & Moreu, 2021; Zhu et al., 2021).

Galgas extensiométricas: En estos sensores se debe tener un mantenimiento constante, se tiene dificultades para medir desplazamientos grandes, la instalación es compleja y laboriosa, además si no se hace correctamente se producen mediciones inexactas, existe sensibilidad al medio ambiente y pueden presentar daño a la estructura cuando se instalan (Kulpa et al., 2021; Munasinghe et al., 2019).

Acelerómetros: Dentro de los inconvenientes se tiene que para obtener el desplazamiento se debe integrar los datos dos veces, baja sensibilidad al desplazamiento, limitaciones al medir longitud de puentes, problemas de adherencia y durabilidad, experimentan desviación gradual del valor verdadero, limitaciones en el rango, tener un posicionamiento correcto, daños a la estructura al instalarlos (Faulkner et al., 2020a; Ma et al., 2021).

Giroscopios: Muestran dificultades de mantenimiento, problemas de precisión por las vibraciones y temperaturas, el desgaste en el concreto genera imprecisión en las mediciones, los requerimientos para instalar son especiales, limitación en la frecuencia de muestreo y presentan dificultad en la adquisición de datos (Faulkner et al., 2020b; Komarizadehasl et al., 2022).

Por otro lado, los **DFOS** tienen ventajas como ser ligeros, compactos, flexibles, son monolíticos (sin necesidad de montaje, fabricados en una sola pieza), operación eléctrica pasiva, resistencia a ambientes hostiles como la humedad, altas temperaturas, químicos y radiación, capacidad de incrustación sin el riesgo de daño a la estructura (considerados como medidas no destructivas), capacidad de multiplexado, seguridad intrínseca al no necesitar de electricidad en el sensor, alta sensibilidad y precisión y la capacidad de detección multiparámetro (Floris et al., 2021).

2.2 Principio de funcionamiento de los DFOS

Los DFOS se caracterizan por utilizar la dispersión o retrodispersión. Esto se define como la interacción entre la luz y un medio óptico (fibra óptica). Cuando la luz se propaga a lo largo de la fibra óptica, varios mecanismos dispersan fotones tanto hacia la fuente de luz como hacia adelante. Con la luz de retrodispersión se logra obtener información sobre las propiedades de la fibra y de los efectos ambientales a los que están siendo sometidas. Estos procesos de dispersión generan los siguientes efectos: Raman, Brillouin y Rayleigh y se muestran en la Fig. 1 (Rajan, 2015).

Dispersión de Raman: Es un proceso de dispersión inelástica (no lineal) y que en gran medida depende de la temperatura de la fibra. En este proceso la energía electromagnética se intercambia por la energía acústica. Este proceso se debe a las vibraciones moleculares donde se dispersa la luz incidente que interactúa con los fonones ópticos. Como la intensidad de los componentes stoke y anti-stoke dependen de la temperatura local de la fibra, solo se utiliza como un DFOS para medir temperatura (Wijaya et al., 2021).

Dispersión de Brillouin: Es un proceso de dispersión inelástico (no lineal) en el que debido a la interacción de la onda de luz y las ondas acústicas (rayos de Stokes) se produce un cambio de frecuencia. El cambio de frecuencia depende de la velocidad acústica y el índice de refracción de la fibra y se ve afectado por la composición de la fibra y los efectos

ambientales como la temperatura y la tensión. Con este proceso se pueden realizar sensores dinámicos y distribuidos que utilizan la modulación temporal de la onda acústica para detectar temperatura, deformación distribuida y vibración. Esto último debido a el principio de interacción de las ondas acústicas (Wijaya et al., 2021).

Dispersión de Rayleigh: Es un proceso de dispersión casi-elástico (lineal) que es por sí mismo independiente de casi cualquier campo físico externo. Se caracteriza porque la luz dispersada tiene la misma longitud de onda que la luz incidente y se utiliza para medir y mapear los efectos de propagación como la ganancia, interferencia de fase, atenuación o variación de la polarización. En la mayoría de estos sistemas, la señal detectada es la intensidad de potencia que variable en el tiempo o el estado de polarización de la retrodispersión de la luz (Wijaya et al., 2021).

Se observa que el mejor principio para trabajar en un DFOS para medir desplazamiento en puentes de concreto es la retrodispersión de Rayleigh. Esto se debe a que la retrodispersión de Raman solo es afectada por la temperatura y no por la tensión que se traduce en desplazamiento. Por otra parte, la retrodispersión de Brillouin es sensible a la tensión que se traduciría en desplazamiento, también es sensible a la vibración debido a las vibraciones acústicas, por lo que adquiriríamos un sensor que es sensible a las vibraciones del medio ambiente que ocasionarían ruido en las mediciones de desplazamiento.

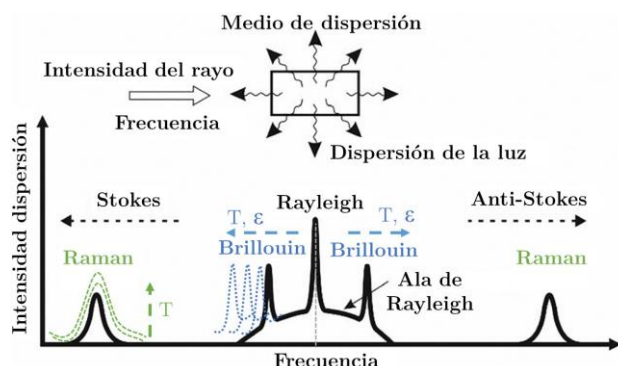


Fig. 1. Espectro de retrodispersión de luz espontánea (Lu et al., 2019)

3. OTDR COMO TÉCNICA PARA ANALISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN EL SHM

3.1 Técnicas disponibles para analizar retrodispersión

Estas técnicas se clasifican de acuerdo a los principios que utilizan. Las que se basan en Rayleigh son la **reflectometría óptica en el dominio del tiempo** (OTDR), la **reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia** (Optical Frequency domain reflectometry, OFDR) y el **Reflectómetro óptico de retrodispersión** (Optical backscatter reflectometer, OBR).

Por otra parte, las técnicas que se basan en el principio de Brillouin son la **reflectometría óptica de Brillouin en el dominio de tiempo** (Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR) y el **análisis óptico de Brillouin en el dominio de tiempo** (Brillouin optical time domain análisis, BOTDA).

OTDR: Consiste en la medición de la atenuación en función del tiempo de un pulso de luz que viaja dentro de un cable de fibra óptica. Esta atenuación ocurre debido a la retrodispersión de Rayleigh por las variaciones microscópicas y aleatorias en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. Cuando un pulso de luz se lanza en un extremo de la fibra óptica sin perturbaciones externas, presentará una atenuación que decae en forma exponencial con respecto al tiempo, sin embargo, si la fibra óptica es sujeta a perturbaciones ambientales como la tensión por desplazamiento, la atenuación no decaerá de forma exponencial como al principio, sino que se mostrará un cambio abrupto en la curva que coincidirá con la zona donde se presentó la perturbación como se observa de la Fig.2. La resolución espacial de un OTDR viene dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta Z_{min} = \frac{c\tau}{2\eta} \quad (1)$$

Donde η es el índice de refracción, c es la velocidad de la luz y τ es el ancho de pulso.

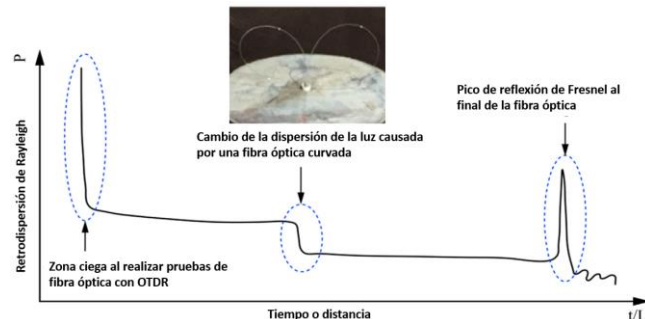


Fig. 2. Vista del efecto esperado en un OTDR mediante un mecanismo transductor (Zheng et al., 2019)

3.2 Trabajos relacionados con el OTDR como DFOS para medir desplazamientos

A continuación, se presentan trabajos relacionados con el tema propuesto para el objeto de estudio con una fecha de cinco años de antigüedad.

En el trabajo de Zheng et al. (2018) se desarrolló un DFOS simple con un amplio rango de desplazamiento incorporando una modulación de flexión por nudo. Propusieron un modelo teórico basado en la geometría del sensor (flexión por nudo) y el principio de pérdida de fibra óptica para calcular la pérdida de la luz y la señal de salida del sensor. Este sensor lo

aplicaron para monitorear daños por deslizamientos de suelo con una gran distancia de detección y alta precisión.

Cheng et al., (2019) desarrollaron un sistema de detección de fibra óptica casi distribuido. Este sistema no tiene algoritmos de demodulación y es aplicado para monitorear el desplazamiento de la abertura entre las losas frontales de las presas de enrocamiento con cara de hormigón. Estos sensores utilizan el principio de pérdida de potencia por macroflexión lineal y están conectados en serie.

En Zheng et al. (2019) realizaron un sensor con una estructura de flexión por nudo para generar una pérdida de potencia considerable. La geometría de modulación de flexión por nudo le permite mantener la forma del sensor y generar pérdidas de fuente de luz durante la extensión y compresión de la fibra sin un mecanismo externo que provoque las curvas. Fue aplicado en ingeniería civil para el monitoreo de desplazamiento de tierra.

Posteriormente Zheng et al. (2020) presentaron un sensor de fisura de fibra óptica basado en pérdida por macroflexión mediante un mecanismo de construcción simple que proporciona un amplio rango para detectar el desplazamiento de fisuras tanto por contracción como por elongación. El sensor presenta una buena capacidad de multiplexación y se puede conectar en serie para realizar un sistema de fibra óptica casi distribuida, monitoreando grandes estructuras.

Zheng, Zhu, et al. (2020) demostraron un sensor casi distribuido de fibra óptica para el monitoreo de deslizamiento de tierra como para deformaciones progresivas del talud, analizando la magnitud del movimiento y las posiciones de las posibles superficies deslizantes. El nuevo sistema estaba conectado en serie por varios sensores de desplazamiento de fibra óptica. Cada sensor introducía pérdida de potencia a través de la disminución de un radio de nudo de fibra óptica cuando se aplicaba el desplazamiento.

En la investigación de Lebang et al. (2021) se midió el deslizamiento de suelo utilizando un sensor de desplazamiento basado en fibra óptica con distintas estructuras, configuraciones, diámetros y direcciones. Utilizaron una estructura compuesta de fibra monomodo y otra compuesta de monomodo-multimodo-monomodo. Los sistemas de pérdida eran nudos con forma de gama, nudo simple y nudo triple. Cuando ocurría un desplazamiento debido a derrumbes provocaban un cambio en los diámetros de los sistemas de nudo, generando pérdida de potencia.

Zheng et al. (2022) propusieron un sensor de desplazamiento de fibra óptica con forma de resorte para monitorear asentamientos. Este sensor incorporó una modulación de flexión de fibra en forma de resorte que aumentó su sensibilidad en flexión, obteniendo un modelo matemático que relaciona el desplazamiento con la pérdida de potencia. Estos sensores se conectan en serie para obtener un monitoreo de detección casi distribuido.

Finalmente Li et al. (2023) demostraron la viabilidad de medir desplazamientos en multipuntos utilizando tres anillos de fibra en bucle. La fibra óptica se envolvió alrededor de la superficie de un cilindro que fue utilizado como sensor de desplazamiento. Obtuvieron un sensor con baja pérdida de inserción y alta sensibilidad al desplazamiento, por lo que no requirieron de ningún equipo adicional en el sistema de medición.

A manera de conclusión se agregan dos tablas con los datos más relevantes de estos sensores analizados.

Como se observa en la Tabla 1 y Tabla 2, se tienen rangos y resoluciones conforme a las aplicaciones para las que fueron diseñados. Se nota que la mayoría de los sensores miden deslizamientos o asentamientos de suelos y fisuras, pero no hay ninguno que permita realizar un monitoreo a los desplazamientos de los tableros de los puentes de concreto por lo que se propone realizar un sensor distribuido o casi distribuido.

Tabla 1. Datos relevantes de los sensores analizados

Autor	Rango (mm)	Resolución (mm)	Sensibilidad (dB/mm)	Aplicación
Zheng et al. (2018)	0-44.7	0.98	No lineal	Deslizamiento de suelo
Cheng et al. (2019)	0-60	10	0.0695	Junta de losas en presas y fisuras
Zheng et al. (2019).	0-34	0.98	No lineal	Deslizamiento de suelo
Zheng, Xiao et al. (2020)-	0-212 0-87.9	2.12 1.84	5.109 5.401	Medición de fisuras

Tabla 2. Datos relevantes de los sensores analizados

Autor	Rango (mm)	Resolución (mm)	Sensibilidad (dB/mm)	Aplicación
Zheng, Zhu et al. (2020)	0-102	0.98	0.027	Deslizamiento de suelo
Lebang et al. (2021)	0-10	0.004	0.241	Deslizamiento de suelo
Zheng et al. (2022).	0-90	0.173	0.00577	Asentamiento de suelo
Li et al. (2023)	0-12	1	3.025	Nivel laboratorio

3.3 Propuesta de OTDR como DFOS para medir desplazamiento entre tableros de puentes de concreto

Se comienza analizando el tamaño de la abertura de los tableros en los puentes de concreto. Esta abertura se estima de acuerdo a la normativa N PRY CAR 6 01 005/01 de la secretaria de Comunicaciones y Transportes, la cual indica la longitud de apoyo mínima que deben tener los tableros de los puentes de concreto. Como los puentes son diversas estructuras se plantea diseñar un sensor que permita ser flexible al momento de instalarlo.

Para utilizar la técnica OTDR se tiene que relacionar la pérdida de potencia con respecto al desplazamiento de los

tableros de los puentes. Para ello se utilizará la curvatura como pérdida de potencia, que a su vez está dividida en modificación de radio de curvatura, modificación de ángulo crítico y la torsión en la fibra óptica. Para ello se diseñan dos mecanismos transductores que permiten curvar la fibra modificando el ángulo y el diámetro.

En la Fig.3 se desarrolla un prototipo que permite curvar la fibra óptica modificando el ángulo crítico de la fibra óptica. Se observa que existe una ranura donde se colocará la fibra óptica. Se pretende colocar este transductor entre los tableros de los puentes de concreto de tal manera que al acercarse o alejarse modificará el ángulo crítico de la fibra, modificando la intensidad captada por el OTDR. Siendo más intensa cuando se acerquen los tableros y menos intensa conforme se alejen. El transductor está realizado con materiales resistentes pero flexibles como ciertos plásticos de impresoras 3D, para captar los movimientos relacionados con los desplazamientos entre tableros de los puentes de concreto y no por movimientos relacionados con movimientos por carga vehicular.

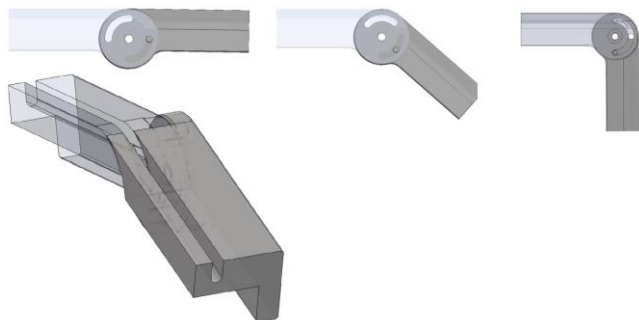


Fig. 3. Mecanismo transductor que modifica el ángulo crítico de la fibra óptica

En la Fig.4 se muestra un prototipo que permitirá modificar la potencia óptica cambiando el diámetro de la configuración en anillo que tiene la fibra óptica. Se observa que existe una ranura donde se colocará la fibra óptica en la parte exterior del transductor. Se pretende colocar este transductor entre los tableros de los puentes de concreto de tal manera que al acercarse o alejarse modificará el diámetro de la fibra, modificando la intensidad captada por el OTDR. Siendo más intensa cuando se acerquen los tableros y menos intensa conforme se alejen.

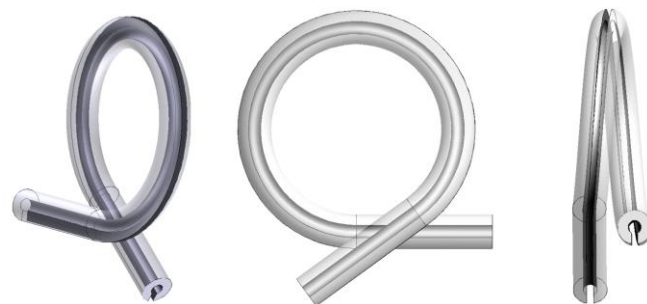


Fig. 4. transductor que modifica el diámetro de la configuración en anillo que tiene la fibra óptica

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los desplazamientos entre los tableros de los puentes de concreto son una preocupación importante para los ingenieros y diseñadores de puentes. Es importante que los puentes de concreto sean inspeccionados y mantenidos regularmente para detectar cualquier problema relacionado con los desplazamientos entre los tableros y tomar medidas preventivas y correctivas. La seguridad y la integridad de los puentes son cruciales para garantizar la seguridad del público y la continuidad de las operaciones de transporte.

Los DFOS son sistemas que ha cobrado relevancia porque detectan factores que afectan a los puentes. La principal ventaja es su capacidad para proporcionar mediciones precisas y continuas de los desplazamientos en todo el puente, lo que permite detectar incluso pequeñas variaciones en la deformación de la estructura y pueden proporcionar mediciones en tiempo real, permitiendo una respuesta rápida a cualquier problema que surja.

Para medir desplazamientos entre los tableros de los puentes de concreto se observó en los trabajos relacionados que se necesita una resolución mayor a 1 mm, porque los desplazamientos que se consideran peligrosos están en el orden de los centímetros. El otro factor a considerar en el diseño es el rango. Los tableros cuentan con una abertura inicial que varía de acuerdo a las características iniciales de la construcción del puente. Esta abertura puede incrementarse o disminuir, de conforme el puente se desplaza. Para que este desplazamiento sea considerado importante según los técnicos encargados debe ser en el orden de los centímetros, por lo que los sensores deben ser flexibles para adaptarlos a las distintas aberturas de que tienen los puentes y garantizar un rango adecuado para la medición.

El desarrollo de los transductores muestra que no deben ser complejos porque se necesita monitorear múltiples puntos. Además, se debe garantizar una buena relación entre la pérdida de potencia con respecto con la técnica OTDR. Esta técnica permite observar cambios de potencia en la distancia de la fibra óptica asignada, aprovechando esto para etiquetar los puntos donde estarán los transductores y saber con certeza donde se está desplazando el puente.

Como trabajos futuros se considera diseñar y construir un banco de pruebas que permita realizar un estudio de la influencia de las interferencias ambientales como lo son la temperatura y la vibración. Si se quiere llevar a implementación en un puente de concreto real y no solo quedarse como prueba experimental se debe tener en cuenta una compensación por el ruido al que va a estar sometido.

REFERENCIAS

- Cheng, L., Li, M., Li, Y., & Yang, J. (2019). Quasidistributed optical fiber sensing system to monitor the displacement of joints on the face slab of concrete-faced rockfill dams. *Optical Engineering*, 58(01), 1. <https://doi.org/10.1117/1.oe.58.1.016107>
- Dong, C. Z., & Catbas, F. N. (2021). A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels. In *Structural Health Monitoring* (Vol. 20, Issue 2, pp. 692–743). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/1475921720935585>
- Faulkner, K., Brownjohn, J. M. W., Wang, Y., & Huseynov, F. (2020a). Tracking bridge tilt behaviour using sensor fusion techniques. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(4), 543–555. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00400-9>
- Faulkner, K., Brownjohn, J. M. W., Wang, Y., & Huseynov, F. (2020b). Tracking bridge tilt behaviour using sensor fusion techniques. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(4), 543–555. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00400-9>
- Floris, I., Adam, J. M., Calderón, P. A., & Sales, S. (2021). Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review. In *Optics and Lasers in Engineering* (Vol. 139). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106508>
- Guzman-Acevedo, G. M., Vazquez-Becerra, G. E., Millan-Almaraz, J. R., Rodriguez-Lozoya, H. E., Reyes-Salazar, A., Gaxiola-Camacho, J. R., & Martinez-Felix, C. A. (2019). GPS, Accelerometer, and Smartphone Fused Smart Sensor for SHM on Real-Scale Bridges. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6429430>
- Komarizadehasl, S., Komary, M., Alahmad, A., Lozano-Galant, J. A., Ramos, G., & Turmo, J. (2022). A Novel Wireless Low-Cost Inclinometer Made from Combining the Measurements of Multiple MEMS Gyroscopes and Accelerometers. *Sensors*, 22(15). <https://doi.org/10.3390/s22155605>
- Kromanis, R., & Kripakaran, P. (2021). A multiple camera position approach for accurate displacement measurement using computer vision. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(3), 661–678. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00473-0>
- Kulpa, M., Howiacki, T., Wiater, A., Siwowski, T., & Sieńko, R. (2021). Strain and displacement measurement based on distributed fibre optic sensing (DFOS) system integrated with FRP composite sandwich panel. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109099>
- Lebang, A. K., Arifin, A., & Abdullah, B. (2021). Displacement sensor based on glass optical fiber for measuring landslide with various configuration. *Indonesian Physical Review*, 4. <https://doi.org/10.29303/ipr>
- Li, H., Wang, F., Wang, X., Yu, K., & Liu, Y. (2023). Multipoint displacement measurement based on low intracavity-loss FLRD method. *Optical Fiber Technology*, 75(December 2022), 103213. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103213>
- Lu, P., Lalam, N., Badar, M., Liu, B., Chorpene, B. T., Buric, M. P., & Ohodnicki, P. R. (2019). Distributed optical fiber sensing: Review and perspective. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 6, Issue 4). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.5113955>
- Ma, Z., Chung, J., Liu, P., & Sohn, H. (2021). Bridge displacement estimation by fusing accelerometer and strain gauge measurements. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(6). <https://doi.org/10.1002/stc.2733>
- Munasinghe, N., Woods, M., Miles, L., & Paul, G. (2019). "3-D Printed Strain Sensor for Structural Health Monitoring".
- Nasimi, R., & Moreu, F. (2021). A methodology for measuring the total displacements of structures using a laser-camera system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(4), 421–437. <https://doi.org/10.1111/mice.12652>
- Rajan, G. (2015). *OPTICAL FIBER SENSORS: advanced techniques and applications* (CRC press, Ed.). www.TechnicalBooksPdf.com
- Wang, X., Zhao, Q., Xi, R., Li, C., Li, G., & Li, L. (2021). Review of Bridge Structural Health Monitoring Based on GNSS: From Displacement Monitoring to Dynamic Characteristic Identification. In *IEEE Access* (Vol. 9, pp. 80043–80065). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3083749>
- Wijaya, H., Rajeev, P., & Gad, E. (2021). Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: Field applications. *Optical Fiber Technology*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102577>
- Zheng, Y., Huang, D., & Zhu, Z. W. (2018). Theoretical and experimental study on fiber-optic displacement sensor with bowknot bending modulation. *Optical Fiber Technology*, 41(December 2017), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.12.008>
- Zheng, Y., Li, Z., Yu, J., & Xiao, J. (2022). Experimental research on a novel spring-shaped fiber-optic displacement sensor for settlement monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110754>
- Zheng, Y., Xiao, W., & Zhu, Z. W. (2020). A simple macro-bending loss optical fiber crack sensor for the use over a large displacement range. *Optical Fiber Technology*, 58(May), 102280. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102280>
- Zheng, Y., Zhu, Z. W., Li, W. J., Gu, D. M., & Xiao, W. (2019). Experimental research on a novel optic fiber sensor based on OTDR for landslide monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106926>
- Zheng, Y., Zhu, Z. W., Xiao, W., Gu, D. M., & Deng, Q. X. (2020). Investigation of a quasi-distributed displacement sensor using the macro-bending loss of an optical fiber. *Optical Fiber Technology*, 55(December 2019), 102140. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102140>
- Zhu, J., Zhang, C., Lu, Z., & Li, X. (2021). A multi-resolution deep feature framework for dynamic displacement measurement of bridges using vision-based tracking system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109847>

Caracterización estructural de películas delgadas de ZnO obtenidas por depósito químico en fase vapor

Lizbeth C. Martínez-Ramos*, Manuel J. Rodríguez-Pérez, Juan M. Durán, Mauricio Huchin y Germán Escalante**.

Universidad Autónoma de Campeche, Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Campus V.

Col. Ex-Hacienda Kalá, San Francisco de Campeche 24085, México.

*e-mail: *al071327@uacam.mx*

***gescalan@uacam.mx*

Resumen: El depósito de películas de ZnO se obtuvo mediante la técnica de depósito químico en fase vapor (CVD) a presión atmosférica, acetilacetato de zinc se utilizó como precursor de Zn y oxígeno como agente oxidante. Las películas de ZnO fueron depositadas en sustratos de vidrio a diferentes temperaturas de depósito (200-300°C). La baja temperatura y una alta razón de depósito facilitan la formación de películas de ZnO. Las propiedades estructurales fueron investigadas por difracción de rayos-X (XRD). Las películas depositadas son policristalinas con orientación preferencial (002). Además se encontró una disminución de la tensión del parámetro de red de las películas de ZnO-Al en función del incremento de la temperatura de depósito. El tamaño promedio de nanocristales se determinó mediante la fórmula de Scherrer.

Palabras clave: ZnO, CVD, difracción de rayos-X.

1. INTRODUCCIÓN

El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor compuesto II-VI con un ancho de banda directa de 3.3 eV, tiene una estructura hexagonal wurtzita con grupo espacial $P6_3mc$, y parámetros de red de $a = 0.3249\text{nm}$, $c = 0.5206\text{nm}$ [1]. El ZnO es un material versátil para una variedad de aplicaciones tales como dispositivos de ondas acústicas, sensores de gas, detectores de ultravioleta (UV), electrodos transparentes, debido a sus propiedades estructurales, ópticas y eléctricas [2-5]. Las películas de ZnO se han preparado utilizando diversos métodos de depósito, tales como, radio frecuencia (RF) sputtering [6], depósito por láser pulsado (PLD) [7], método sol-gel [8], spray pirolisis [9], depósito químico en fase vapor a presión atmosférica (APCVD) [10]. Existe un creciente interés en el depósito químico en fase vapor (CVD) a presión atmosférica, debido a su baja temperatura de crecimiento, alta velocidad de depósito y bajo costo; es una técnica sencilla y se ha utilizado para producir películas de alta calidad [11-13]. El acetilacetato de zinc y/o el acetato de zinc dihidratado pueden ser utilizados como fuente de zinc, porque son químicamente estables en aire atmosférico [14]. En este trabajo, reportamos el depósito de películas de ZnO por CVD a presión atmosférica con acetilacetato de zinc como material precursor.

de zinc ($C_{10}H_{14}O_4Zn$) en forma de pastilla como material precursor. El depósito tuvo lugar en una cámara de reacción vertical bajo un ambiente de oxígeno (O_2). Durante el proceso de depósito la temperatura del sustrato se varió de 200 a 300°C en intervalos de 50°C y la temperatura del material fuente se mantuvo en 190°C. El acetilacetato de zinc sólido fue evaporado y luego descompuesto para formar ZnO en ambiente de O_2 . El tiempo de depósito fue de 10 min. Las propiedades estructurales de las películas fueron analizadas por difracción de rayos-X (XRD) utilizando un difractómetro Brucker D8 Discover, con radiación $CuK\alpha$ ($\lambda = 0.1546\text{nm}$).

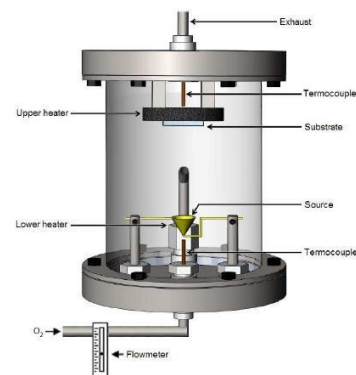


Figura 1. Diagrama de un sistema CVD [16].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La figura 1 muestra un diagrama de un sistema CVD [15]. Las películas de ZnO se depositaron en sustratos de vidrio por la técnica CVD a presión atmosférica utilizando acetilacetato

3. RESULTADOS

La temperatura de depósito juega un papel importante en la determinación de la estructura de las películas de ZnO. La

figura 2 muestra los patrones de difracción de rayos-X de las películas de ZnO depositadas a diferentes temperaturas, se observa picos de difracción en 31.68°, 34.34°, 36.16° y 56.52° correspondientes a los planos (100), (002), (101) y (110), respectivamente, estos planos corresponden con el patrón estándar de ZnO (PDF 00-036-1451), indicando que las películas depositadas son policristalinas. La película depositada a 200 °C tiene una orientación asociada al plano (002). El ZnO generalmente crece con una orientación preferencial al plano (002) debido a la baja energía libre superficial (9.9 eV/nm²) en comparación con los planos (110) y (100) (12.3 y 20.9 eV/nm² respectivamente) [17]. Sin embargo, estudios recientes demuestran que si el depósito se realiza a baja temperatura y/o alta velocidad, es posible que las películas de ZnO crezcan con otra orientación, las cuales pueden ser (100) o (110) [18].

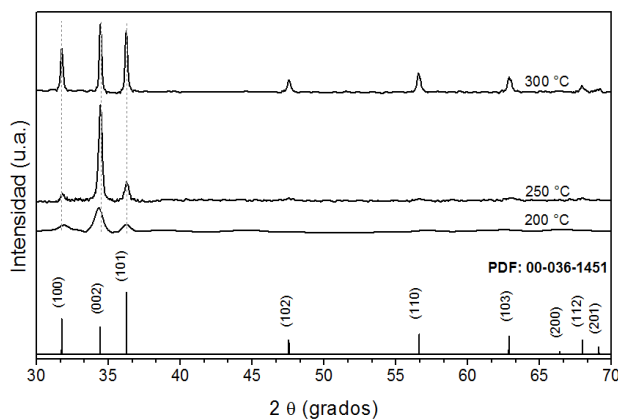


Figura 2. Patrón de difracción de rayos-X de las películas de ZnO depositadas a diferentes temperaturas.

Cuando la temperatura de depósito es de 250 °C el patrón de difracción de rayos-X muestra una mayor intensidad en el plano. A medida que incrementa la temperatura de depósito (300 °C), se observa una contribución significativa en los planos (100) y (101). Las películas de ZnO depositadas muestran siempre una orientación en el plano (002), debido a su menor energía libre superficial [19], es decir, hay un crecimiento preferencial en el eje-c de la red cristalina de forma perpendicular al sustrato. Acorde a lo que obtuvo Lu, et al., al sintetizar ZnO a una presión atmosférica de 102 Pa [20]. La orientación (002) disminuye su intensidad cuando la película se deposita a 300 °C. Se puede asumir que la temperatura es demasiado elevada que contribuye a la re-evaporación de las películas depositadas en lugar de permitir que los átomos se muevan a sitios estables [21].

El tamaño de grano (D) se calculó mediante la fórmula de Scherrer [16]:

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta}$$

donde λ es la longitud de onda (Cu K α = 1.5406 Å), θ es el ángulo de difracción de Bragg y B es el ancho total a la mitad del máximo (FWHM) del pico de difracción.

Los valores para el tamaño de grano obtenidos de las orientaciones (100), (002) y (101) de las películas de ZnO se muestran en la Tabla 1. Dichos valores son inferiores a 8 nm. Además, esto muestra que el tamaño de grano aumenta con el aumento de la temperatura de deposición.

Tabla 1. Valores de tamaño de grano de las películas depositadas.

T _{depósito} (°C)	Tamaño de grano (nm)		
	(100)	(002)	(101)
200	6.911	7.674	7.819
250	7.319	7.728	7.873
300	7.911	7.913	7.809

Para un material con estructura cristalina hexagonal como es el ZnO, se puede obtener los parámetros de red a y c [22], mediante los índices de Miller (hkl) y la posición de los picos de difracción de los planos (100) y (002), lo cual hace posible determinar el stress en las películas de ZnO depositadas. Los valores teóricos de los parámetros de red a y c son 0.3249 nm y 0.5206 nm, respectivamente. La tabla 2 muestra los valores experimentales de los parámetros de red a y c.

Tabla 2. Valores de los parámetros de red a y c en función de la temperatura de depósito.

T (°C)	a (nm)	c (nm)
200	0.3258	0.5235
250	0.3248	0.5226
300	0.3249	0.5210

Existe una diferencia entre el valor teórico y el experimental, esto se debe al desplazamiento de los planos de difracción. Los valores experimentales de los parámetros de red, que están por debajo de su valor teórico indican un stress compresivo, mientras que los valores que están por encima muestran stress expansivo [23]. El estrés en las películas de ZnO depositadas puede atribuirse a que la temperatura de depósito es tan baja que los átomos intersticiales no tienen suficiente energía para ajustarse a los sitios de la red [24].

4. CONCLUSIONES

En resumen, se depositaron películas de ZnO sobre sustratos de vidrio por la técnica CVD a presión atmosférica utilizando

acetilacetato de zinc como material precursor de zinc. La película de ZnO depositada a 250°C presenta una mayor orientación en el plano (002) y una superficie homogénea visualmente. Los valores de los parámetros de red presentan valores similares a los teóricos por lo que, las películas depositadas presentan un stress insignificante.

REFERENCIAS

- [1] S.L. King, J.G.E. Gardeniers and I.W. Boyd. *Applied Surface Science* 96-98 (1996) 811-818.
- [2] X. Chen, D. Liu, J. Chen and G. Wang. *Smart Materials and Structures* 18 (2009) 115021.
- [3] M. Suche, S. Christoulakis, K. Moschovis, N. Katsarakis and G. Kiriakidis. *Thin Solid Films* 515 (2006) 551-554.
- [4] Q.A. Xu, J.W. Zhang, K.R. Ju, X.D. Yang and X. Hou. *Journal of Crystal Growth* 289 (2006) 44-47.
- [5] W. Beyer, J. Hüpkens, H. Stiebig. *Thin Solid Films* 516 (2007) 147-154.
- [6] Y.M. Lu, W.S. Hwang, W.Y. Liu and J.S. Yang. *Materials Chemistry and Physics* 72 (2001) 269-272.
- [7] M. Joseph, H. Tabata, H. Saeki, K. Ueda and T. Kawai. *Physica B* 302-303 (2001) 140-148.
- [8] M. Ohyama, H. Kozuka and T. Yoko. *Thin Solid Films* 306 (1997) 78-85.
- [9] D.J. Goyal, C. Agashe, M.G. Takwale, B.R. Marathe and V.G. Bhide. *Journal of Materials Science* 27 (1992) 4705-4708.
- [10] K. Haga, F. Katahira, H. Watanabe. *Thin Solid Films* 343-344 (1999) 145-147.
- [11] A.J. Petrella, H. Deng, N.K. Roberts, R.N. Lamb. *Chemistry of Materials* 14/10 (2002) 4339-4342.
- [12] H. Deng, J. J. Russell, R. N. Lamb, B. Jiang, Y. Li and X. Y. Zhou. *Thin Solid Films* 458 (2004) 43-46.
- [13] J. Lu, Z. Ye, Y. Zhang, J. Huang, and B. Zhao. *Chinese Journal of Semiconductors* 24 (2003) 1-5.
- [14] T. Minami, H. Sonohara, S. Takata and H. Sato. *Journal of Applied Physics* 33 (1994) L713-L746.
- [15] G. Escalante, H. Juárez, M. Pacio, G. García, T. Díaz, E. Rosendo, A. Coyopol. *Low temperature ZnO films deposited by SSCVD*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 45 (2013) 012012.
- [16] G. Escalante, H. Juárez, M. Pacio, G. García, T. Díaz, E. Rosendo, A. Coyopol, *Low temperature ZnO films deposited by SSCVD*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 45 (2013) 012012.
- [17] H.T. Nguyen, A.J. Hartmann y R.N. Lamb. *Journal of Physical Chemistry B* 103 (1999) 4264.
- [18] W.W. Lam y I. Shih. *Materials Letters* 38 (1999) 6.
- [19] N. Fujimura, T. Nishihara, S. Goto, J. Xua and T. Ito, *Journal of Crystal Growth* 130 (1993) 269-279.
- [20] J. Lu, Z. Ye, J. Huang, L. Wang y B. Zhao. *Applied Surface Science* 207 (2003) 295-299.
- [21] J.G. Lu, T. Kawaharamura, H. Nishinaka, Y. Kamada, T. Ohshima and S. Fujita. *Journal of Crystal Growth* 299 (2007) 1-10.
- [22] W.L. Bond. *Crystal Technology*. John Wiley & Sons. New York, 1976.
- [23] A.J. Perry, V. Valvoda and D. Rafaja, *Thin Solid films* 214 (1992) 169-174.
- [24] J.G. Lu, Z.Z. Ye, H.H. Chen, J.Y. Huang and B.H. Zhao. *International Journal of Modern Physics B*, 16 28&29 (2002) 4250-4254.

Análisis de los diferentes métodos para la elaboración de bebida de frutas fermentadas con Kéfir

Tlaloc González Sánchez* Carlos Manuel Astorga Zaragoza*
Gloria Lilia Osorio Gordillo*

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado
Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.
e-mail: m22ce076@cenidet.tecnm.mx*

Resumen: El tepache hoy en día es preparado por medio de la fermentación de la pulpa y cáscara de diversos frutos como piña, fresa, mora y mango. Estas son puestas a fermentar con cultivo de kéfir. El tiempo de fermentación es variable mientras permanece en barriles de madera (llamados *tepacheras*), en agua endulzada con piloncillo. En este contexto, este trabajo analiza los métodos de elaboración de tepache con frutos y kéfir, obteniendo los parámetros de mayor importancia que permiten estandarizar los diferentes métodos para la preparación de una bebida probiótica.

Keywords: Fermentación, Parámetros de fermentación, Kéfir, Bebida probiótica.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la época prehispánica, las bebidas fermentadas son consumidas en México. Entre las más populares se encuentran, el tepache, pulque, tejuino y pozol, estas bebidas se consideran refrescos de baja graduación alcohólica (Godoy et al., 2003).

El tepache es la bebida fermentada tradicional más popular, preparada por métodos tradicionales a partir de cáscaras de piña, azúcar (azúcar morena, panela), agua. La fermentación del tepache normalmente se realiza en barriles de madera, a temperatura ambiente, de 1 a 4 días, por lo tanto, el problema que se observa en los resultados, es el tiempo que tarda y la acidez que produce la fermentación, es decir, no se puede garantizar una bebida probiótica (Alvarado et al., 2006).

La fermentación de tepache es afectada por factores biológicos, ambientales y químicos, en este caso es la temperatura, concentración de azúcares, pH y tiempo que tarda en fermentar, es decir, la bebida se ve modificada en sus características del producto final (Aidoo et al., 2006).

Si la fermentación continúa por más de cuatro días, la concentración de ácido acético aumenta y más que desagradable puede ser un irritante estomacal, es decir, tiene consecuencias en la salud (Moreno Terrazas Casildo, 2005); (Swiegers et al., 2005).

En este artículo, se analizan los métodos de preparación de tepache para la fermentación adecuada, asimismo, identificar los parámetros que se deben controlar para

generar una bebida con los mejores beneficios, evaluamos las principales variables del proceso de fermentación del tepache (concentración de panela, temperatura de fermentación, pH inicial y tiempo de fermentación) (Corona-González et al., 2013) para correlacionar la formación de elementos microbiológicos de fermentación (ácido láctico y ácido acético). Asimismo, la aceptación de la bebida entre los consumidores. Los resultados se compararon para identificar el método que garantiza el discernimiento del control de las condiciones de fermentación para su industrialización, asimismo, la importancia de controlar la temperatura y monitorear el pH, nos permite tener una bebida probiótica.

2. ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE PREPARACIÓN

2.1 Tepache de piña con kéfir

El kéfir fue adquirido en el Estado de México, posteriormente, son hidratados en un matraz de 3 litros al que a su vez, le es adicionado el sustrato panela en un 5%. La fermentación la realizaron durante 72 h (Villegas et al., 2016).

Para elaborar el medio de fermentación (Camacho-Ruiz et al., 2016), llevaron a cabo un método en el que pesaron 12.5gr. de azúcar mascabada y agregaron a 237.5ml de agua potable, utilizando un frasco de 1 litro. Además, fueron adicionados 200gr. de piña (4 piezas), asimismo 12gr. de kéfir de agua. Realizaron 8 medios de fermentación por cada lote y por duplicado, posteriormente,

realizaron durante 53 h mediante una toma de muestras a las 0, 6, 10, 23, 29, 33, 48 y 53 h. Se empleo el método agar MRS (es un medio por el cual se representa un cultivo que se utiliza para el crecimiento y recuento de *Lactobacillus* en productos de la industria láctea.) (López-Rojo et al., 2017).

Por otro lado, en la producción de biomasa obtuvieron a las 53h un resultado de 36.7gr., corresponde en un incremento del 74.6 % con respecto al valor inicial, asimismo, un pH de 4.67 ± 0.02 . (Stadie et al., 2013) siendo así, el pH con mejores resultados, ideal para el crecimiento de kéfir de agua y finalmente la concentración de ácido láctico que se generó fue de 0.477 g/100 ml (López-Rojo et al., 2017).

2.2 Tepache de mango con kéfir

Los granos de kéfir fueron obtenidos de una casa particular ubicada en Campinas (estado de Sao Paulo, Brasil). Cultivaron muestras de granos de kéfir a una concentración del 10% en matraces Erlenmeyer de 250 ml en donde se colocaron 50 ml de leche entera UHT a una temperatura de incubación de 30°C en una incubadora bacteriológica (Modelo 002 CB FANEM) en condiciones estáticas, con renovación del medio de crecimiento (leche entera UHT) cada 24 h. La biomasa producida se utilizó como preinóculo para el proceso de fermentación (Vicessuto and de Castro, 2020).

El mango verde maduro lo adquirieron de un mercado local de Campinas (estado de Sao Paulo, Brasil) en octubre de 2018. Los frutos de mango los limpiaron con agua destilada y las cáscaras se separaron manualmente con un cuchillo de acero inoxidable y fue utilizado para complementar el medio de cultivo base (leche entera UHT) aplicado a los procesos de fermentación con granos de kéfir (Vicessuto and de Castro, 2020).

El perfil de cambio de pH lo evaluaron a lo largo de la cinética de fermentación durante 12 h, con muestreos cada 2 h, en donde obtuvieron que por cada dos horas iniciando en un pH de 6 y terminando con 4.5 pH, asimismo, la cáscara del mango también contribuye a la reducción del pH, ya que estos polisacáridos se transforman en glucosa, que finalmente es convertida en ácido láctico por acción de los microorganismos (Jawad et al., 2013). Ambas tenían perfiles de reducción de pH muy similares, que se debieron principalmente a la acumulación de metabolitos producidos por las bacterias del ácido láctico presentes en los granos de kéfir, como el ácido láctico (Vicessuto and de Castro, 2020).

2.3 Tepache de mora, fresa y piña, con kéfir

Para el análisis, existió presencia de microorganismos probióticos dentro en los tres jugos que se observaron en donde la carga microbiana llegando a los 7 días fue de 1.71×10^6 UFC/ml aunque reduce una vez que llega a los 21 días de almacenamiento es decir, 47733.33×10^4

Tepache	pH	Hrs. De fermentación	Temperatura °C
manzana	3.8	72	25
Piña	4.6	48	36
Mango	4.5	24	30
Fresa	3.8	72	25
Mora	3.8	72	25

Fig. 1. Tabla: parámetros que obtuvieron los métodos de fermentación analizados con los mejores resultados para una bebida probiótica.

UFC/ml, valores que se encuentran de acuerdo con la norma técnica Ecuatoriana INEN 1334-3 se aplica a todo producto alimenticio procesado, envasado y empaquetado que se ofrece como tal para la venta directa al consumidor (Muyulem et al., 2022).

El contenido de pH disminuye ligeramente desde que se pone a fermentar y una vez que se llega a los 21 días, se considera que cumple de igual forma con la norma técnica ecuatoriana INEN 2337 (2008) esta norma establece los requisitos que deben cumplir los jugos, pulpas, concentrados, bebidas de frutas y vegetales, mientras que el jugo de las frutas debe tener valores inferiores a 4,5 en pH, asimismo, el valor que obtuvieron fue superior al que encontrado en los resultados previos, por lo que es considerado un producto de buena calidad. Por lo tanto, el pH final fue de 3,72 a 3,83 (Muyulem et al., 2022).

2.4 Resultados

Como se puede ver en la tabla. 1, tenemos claros los parámetros que se pueden controlar para obtener una bebida probiótica, además, permite poder estandarizar el proceso de elaboración por medios de sistemas de control, por otro lado, en México contamos con la norma "Determinación de pH en Alimentos" NMX-F-436-SCFI-2011, "Preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico" NOM-110-SSA1-1994. Que son aplicables al método de fermentación.

3. CONCLUSIÓN

La importancia de tener presentes los parámetros óptimos para la fermentación de tepache con cultivo de kéfir, permite realizar un producto probiótico estandarizado, tomando en cuenta que puede ser producida una gran variedad de procesos de elaboración de tepache.

REFERENCIAS

- Aidoo, K.E., Rob Nout, M., and Sarkar, P.K. (2006). Occurrence and function of yeasts in asian indigenous fermented foods. *FEMS yeast research*, 6(1), 30–39.
- Alvarado, C., Almendárez, B.G., Martin, S., and Regalado, C. (2006). Bacterias ácido lácticas aisladas

- de alimentos tradicionales mexicanos con potencial de utilización como antimicrobianos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(3-4), 260–268.
- Camacho-Ruiz, M., Camacho-Ruiz, R., Armendariz, M., Ramirez-Velasco, L., Asaff-Torres, A., Levasseur, A., Mateos-Díaz, J., and Rodríguez, J. (2016). Corn bran as potential substrate for high production of feruloyl and acetylxytan esterases by solid state fermentation. *Revista mexicana de ingeniería química*, 15(1), 11–21.
- Corona-González, R., Ramos-Ibarra, J., Gutiérrez-González, P., Pelayo-Ortiz, C., Guatemala-Morales, G., and Arriola-Guevara, E. (2013). The use of response surface methodology to evaluate the fermentation conditions in the production of tepache. *Revista mexicana de ingeniería química*, 12(1), 19–28.
- Godoy, A., Herrera, T., and Ulloa, M. (2003). *Más allá del pulque y el tepache: las bebidas alcohólicas no destiladas indígenas de México*. Unam.
- Jawad, A.H., Alkarkhi, A.F., Jason, O.C., Easa, A.M., and Norulaini, N.N. (2013). Production of the lactic acid from mango peel waste—factorial experiment. *Journal of King Saud University-Science*, 25(1), 39–45.
- López-Rojo, J., García-Pinilla, S., Hernández-Sánchez, H., and Cornejo-Mazón, M. (2017). Estudio de la fermentación de kéfir de agua de piña con tibicos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(2), 405–414.
- Moreno Terrazas Casildo, R.D. (2005). *Determinación de las características microbiológicas, bioquímicas, fisicoquímicas y sensoriales para la estandarización del proceso de elaboración de tepache*. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco.
- Muyulem, N.d.R.S., Rodríguez, F.P.E., and Guzmán, M.E.A. (2022). Elaboración de jugo con tres diferentes frutas, adicionando el 50% de cultivo de hongos tibetanos. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 7(1), 77.
- Stadie, J., Gultiz, A., Ehrmann, M.A., and Vogel, R.F. (2013). Metabolic activity and symbiotic interactions of lactic acid bacteria and yeasts isolated from water kefir. *Food microbiology*, 35(2), 92–98.
- Swiegers, J., Bartowsky, E., Henschke, P., and Pretorius, I. (2005). Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour. *Australian Journal of grape and wine research*, 11(2), 139–173.
- Vicenssuto, G.M. and de Castro, R.J.S. (2020). Development of a novel probiotic milk product with enhanced antioxidant properties using mango peel as a fermentation substrate. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 24, 101564.
- Villegas, E., Téllez-Téllez, M., Rodríguez, A., Carreón-Palacios, A., Acosta-Urdapilleta, M., Kumar-Gupta, V., and Díaz-Godínez, G. (2016). Laccase activity of *Pycnoporus cinnabarinus* grown in different culture systems. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 703–710.



INGENIERÍA MECÁNICA

Análisis de variables (QFD) en el Proceso de Fabricación de Barras de Poliuretano

Angel Peralta Meza*. Víctor Mauricio Estrada Ruiz.**
Iván García Garrobo***

*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior
de Nuevo Casas Grandes, México aperalta@itsnecg.edu.mx

** Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior
de Nuevo Casas Grandes, México vestrada@itsnecg.edu.mx

*** Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior
de Nuevo Casas Grandes, México igarrobo@itsnecg.edu.mx

Resumen: En este trabajo describe el proceso de fabricación de barras de poliuretano, que posteriormente servirán para maquinar sellos hidráulicos y neumáticos, utilizados en la industria agrícola y de la construcción. Conocer el proceso permite la reproducción de materia prima propia, para en la región de Nuevo Casas Grandes, Chihuahua, México. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo mostrar el procedimiento, técnica, equipo y materia prima necesaria para la polimerización de las barras, además de ser maquinable, identificar y conocer las variables críticas del proceso, por medio de despliegue de la función de calidad (QFD). El estudio muestra que se puede fabricar y perfeccionar el proceso en cuanto; a la calidad de sus propiedades mecánicas de las barras de poliuretano y caracterización, mediante tres variables importantes que son; las revoluciones por minuto de la propela, tiempo de mezclado y presión de vacío.

Palabras clave: Polimerización, fabricación de barras de poliuretano, sellos.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el principio de los tiempos, el hombre ha empleado polímeros naturales para satisfacer sus necesidades: madera, cuero, resinas, gomas naturales, fibras como el algodón, lana y seda. Sin embargo, contrariamente a otros materiales, como los metales o las cerámicas, que se han desarrollado a lo largo de miles de años, los polímeros sintéticos son un invento del siglo XX, pudiendo considerarse que su importancia empezó en la década de los treinta, en que comenzaron a desarrollarse los polímeros vinílicos, el neopreno, el estireno, el nylon y otros. (González de la Campa, 2007).

Por primera vez, Otto Bayer en 1937, desarrolló la síntesis de estos polímeros, (Gregori, y otros, 2007) mediante una reacción de poli adición con grupos de isocianato, sin necesidad de remover agua. Se plantea que, en 1982, la producción del mismo llega a ser aproximadamente 3 millones de toneladas, las cuales tenían un valor de 6 billones de dólares y ya para el 2002 la producción de poliuretanos abarca aproximadamente el 12% del mercado de los elastómeros (Mc, 2004). Diversos autores se han dedicado al estudio y obtención de materiales poliméricos partiendo de reacciones clásicas (Correia, Bordado, & Clarke, 2005) (Stokes K, 1995). El desarrollo de nuevos materiales ha generado a su vez, la búsqueda de métodos innovadores a través de los cuales es posible la modificación de reacciones químicas de una forma más eficiente (Price, Lennz,

& Ansell, 2002). Los poliuretanos, actualmente se han ganado una posición envidiable como materiales biomédicos, por ser biodegradables y no tóxicos, además de tener excelentes propiedades de flexibilidad, elevada resistencia al impacto y durabilidad, características que lo convierten en polímeros con múltiples aplicaciones (N Sheikh, 2000), estos compuestos se pueden obtener por poli adición. El primer poliuretano comercializable es producido por reacción entre el 1.6 hexametilenediisocianato y 1.4 butanodiol, obteniéndose una poliamida que se usó por muchos años en las celdas de los cepillos de dientes. Posteriormente, materiales con propiedades semejantes a las gomas se obtienen a través de reacción entre hidroxilos funcionales de poliésteres y disocianatos. Las propiedades de los poliuretanos elastómeros están influenciadas por el proceso de moldeo, así como por la selección de las materias primas (Markusch, 1997).

Se han utilizado diferentes tipos de materiales desde el cuero, cauchos, plásticos entre otros incluyendo el poliuretano que ha sido una pieza clave para fabricar distintos tipos de retenes conocidos como: sellos, polipack, retenes, empaques, etc. La mejor opción en términos económicos y desarrollo tecnológico es fabricar la barra.

Por otra parte, para la realización de un material maquinable de poliuretano se debe partir primero de una caracterización al cual se desea llegar, esta se basa en definir las propiedades

relevantes: densidad, dureza, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, maquinabilidad y porosidad que tiene el poliuretano. Así definir unos estándares mínimos, los cuales deben satisfacerse para poder alcanzar una cantidad deseada en el material a elaborar.

Sin embargo, los procedimientos publicados sobre el proceso de la fabricación del poliuretano son exclusivos y carecen de explicación detallada de sus puntos críticos, para obtener una calidad aceptable. Asimismo (Arana & López, 2008) propone una cantidad y tipos de agitador para homogenizar la mezcla, sin en cambio en términos de calidad interfieren más variables que influyen en el producto es decir en la barra de poliuretano.

Por lo tanto el problema en esta investigación es determinar cuáles son las variables más importantes para el desarrollo de las barras de poliuretano, se pretende aplicar un proceso con materia prima y equipo necesarios (figura 1), para conocer las variables críticas, el objetivo es producir barras de poliuretano que se puedan maquinar mediante este proceso de manufactura, conociendo los puntos críticos del proceso, existen herramientas específicas para lograr la calidad de un producto, como, el despliegue de la función de calidad, que sirve para traducir las necesidades y expectativas de los clientes en especificaciones del diseño y fabricación del producto. (Akao, 1993). De esta forma determinar de manera cualitativa las variables de entrada y salida del proceso importantes que determinen características y calidad del producto.

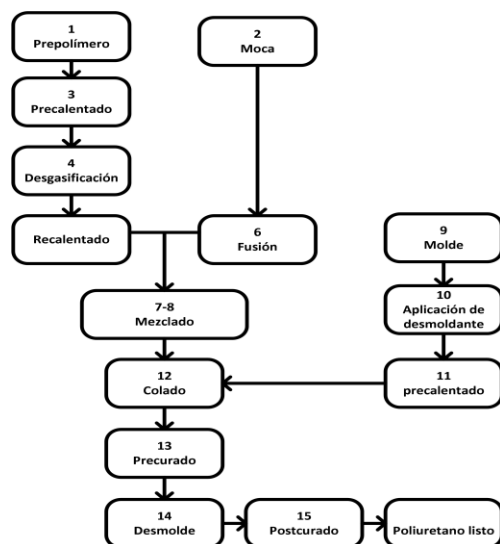


Figura 1. Proceso de polimerización

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En los materiales que se encontraron al alcance son: El prepolimero de uretano RU-2028/HD-3736 y isocianato TG 263 MOCA de “Quimicaicabe” propiedades tabla 1. La Información técnica del prepolimero RU-2028 e isocianato HD-3736 podemos verlo en la tabla 2.

Tabla 1. Propiedades técnicas

Propiedades del elastómero		
Prepolimero		
Resistencia a la tensión	Din 53504	34Mpa
Dureza	Din 53505	shore A 97

Fuente: (Icabe, 2016)

Tabla 2. Propiedades típicas del sistema de curado

apariencia	RU-2028 Líquido transparente libre de partículas en suspensión	HD-3736 Sólido en forma de perla(MOCA)
Color, garder, max Color visual	3	amarillo
Viscosidad, a 30 °C	5000-8000	
Contenido de NCO, %	6.15-6.55	
Temperatura de fusión, °C		100-109
Tiempo de vida en almacén, meses	6	6

Fuente: Datos técnicos del comerciante

2. METODOLOGÍA

Para estandarizar el proceso del desarrollo de las barras de poliuretano se llevó a cabo alrededor de 27 muestras que sirven para la discriminación de las variables críticas del proceso por medio de QFD

2.1 preparación del equipo y materiales

Para la preparación de la prueba para la mezcla y polimerización se utiliza los siguientes elementos y equipos.

Equipo:

- Propela o Hélice
- Cámara desgasificadora
- Horno 220 volts 3500 watts horno eléctrico. - de resistencias, controlado por pirómetro y alimentado a 220 volts. 3500 watts.
- Cuarto cerrado 4m x 6m
- Parrilla eléctrica
- Termómetro hasta 150 o 200 grados centígrados.
- Taladro con regulador de velocidad
- Mesa de trabajo
- Báscula digital
- Tubos de metal (molde)
- Mascarilla contra vapores orgánicos
- Guantes de carnaza
- Bata de manga larga
- Gafas de protección
- Calzado industrial

- Tanque de gas LP
- Soplete
- Botes de lata
- Thinner (solvente)
- Brocha

ESPACIO DE TRABAJO

Se desarrolla en un espacio de aproximadamente 4 x 6 m² debiendo estar cerrado, para evitar la humedad, con su respectiva salida de vapores.

EQUIPO DE SEGURIDAD

Se requiere utilizar mascarilla contra vapores orgánicos guantes tipo japonés o de carnaza, bata de manga larga, gafas, calzado industrial.

PROCESO DE POLIMERIZACIÓN

1. Cálculo de las cantidades necesarias de prepolímero y de moca

$$A_T = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \quad (1)$$

$$V = A_T * h \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m_T}{V} \quad (3)$$

$$moca.g = \frac{(\%NCO)(\rho_{moca})(0.95)}{42.02} \quad (4)$$

$$\%moca = \frac{moca.g}{100 + moca.g} \quad (5)$$

$$\%prepolimero = 100 - \%moca \quad (6)$$

$$g_{democa} = m_T * \%moca \quad (7)$$

$$\%NCO = Cantidad.de.isocianato.enelprepolimero \quad (8)$$

$$g_{de.prepolimero} = m_T * \%prepolimero \quad (9)$$

$$m_T = g_{democa} + g_{deprepolimero} \quad (10)$$

$$A_T = \text{área.total} \quad (11)$$

$$h = \text{altura.del.cilindro} \quad (12)$$

$$V = \text{volumen} \quad (13)$$

$$\rho_{moca} = \text{densidad} 133.5 \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (14)$$

$$\rho_{prepolimero} = 1.3 \frac{g}{cm^3} \quad (15)$$

2. Se pesa la moca y el prepolímero
3. Precalentar el pre polímero a una temperatura no mayor a de 115 °C, (entre temperatura 80-90 °C)
4. Se desgasifica a 24" de Hg de vacío durante diferentes tiempos, observando por la mirilla de la cámara que no se vaya a derramar el bote; hasta que se observe la superficie limpia y sin burbujas.
5. Se recalienta 2.-Una vez eliminadas las burbujas según el tiempo que se someta, se introducirá de nuevo al horno para obtener una temperatura de 80 °C.
6. Se calienta la moca a 115-116 °C.
7. Mezclado. - Una vez alcanzada la temperatura de 80 °C se procede a sacar del horno el pre polímero. Incorporar la moca sin que baje la temperatura a menos de 115 °C, Se mezcla la moca al pre polímero inclinando el bote del pre polímero de manera que la moca baje por la pared del bote cuidando que no atrape ninguna burbuja de aire.
8. Se procede a mezclar los componentes usando la propela Figura 1, de manera que se mantenga el giro de las aspas hasta la base del bote, cuidando que nunca se salgan las aspas de la mezcla, ya que al menor error se introducirá aire y se harían burbujas. Se contará el tiempo desde el momento en que se añade la moca, transcurriendo 10 segundos, pues el tiempo es corto relativamente.
9. Usar un molde de tubo metálico previamente calentado a 110° C para que en el momento en que cierren las moléculas del poliuretano (gelado) lo hagan completamente y así se obtenga una pieza de buena calidad y homogénea
10. Se aplica desmoldante al molde.
11. Precalentar el molde a 110 °C.
12. Colado. - Se vacía la mezcla en los tubos o moldes que se encuentran en el horno previamente calentado a 110 °C. se vacía en los moldes dentro del horno, nunca afuera se toman los tubos y se inclinan para que el material baje por la pared lentamente pero fluido, recordando que el tiempo sigue transcurriendo y se puede gelar el material. Se le pasa el soplete en la superficie en un solo trazo, quemando las burbujas que suben y así, darle un mejor acabado al buje.
13. Pre curado. - se mete al horno 30 minutos.
14. Transcurrido los 30 min se procede a desmoldarlo
15. Post curado. - Después de vaciar, la mezcla al molde se dejará curar por intervalos de tiempo entre 6 y 9 horas a 100 °C más dos días de temperatura ambiente, (según el manual del proveedor).



Figura 2. Barra de poliuretano hecha con el proceso descrito en la metodología

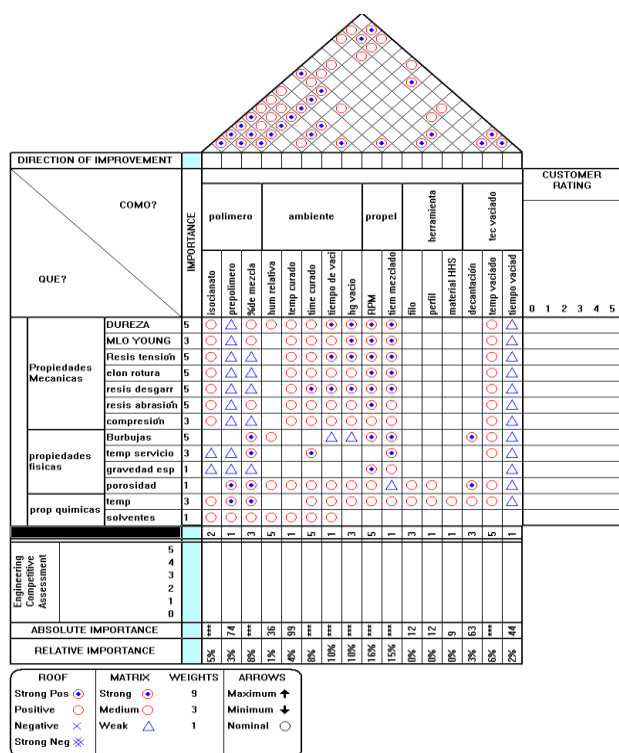


Figura 3. Despliegue de la función de la calidad.
Fuente: Diseño Propio

3. RESULTADOS

Se hace el análisis con el despliegue de la función de la calidad, con factores o variables de entrada y salidas que intervienen y se correlacionan en índice de importancia en cada una de las matrices, y se relacionan en conjunto para dar características mecánicas, físicas y químicas de la barra como se muestra en la figura 3.

	Variables de entrada	Porcentaje de importancia (%)
1	RPM de la propela	16
2	Tiempo de mezclado	15
3	Presión de vacío	10
4	Tiempo de vacío	10
5	Tiempo de curado	8
6	Mezcla de componentes	8
7	Temperatura de vaciado	6
8	Isocianato	5
9	Prepolímero	3
10	Temperatura de curado	4
11	Decantación	3
12	Temperatura de vaciado	2
13	Humedad relativa	1
14	Filo de la herramienta	0
15	Perfil del sello	0
16	Material de la herramienta	0

Tabla 3. Resultados en porcentaje de importancia QFD Fuente: Diseño propio

DISCUSIÓN

En el factor de revoluciones por minuto de la propela se utilizó una propela de fabricación casera se considera una pieza clave para la homogenización del Prepolímero e isocianato, determinante para la cantidad de burbujas ya que puede las micro cavidades pueden provocar fractura del polímero (R. Askeland, 1998) se recomienda el diseño de la propela, para posteriores investigaciones.

En cuanto al tiempo de mezclado, según el análisis en su importancia es de 15% dentro del proceso, ya que si se tarda el tiempo de mezclado empieza a solidificarse antes de que entre al molde, por lo contrario, si es menor el tiempo no existe buena homogenización.

Respectivamente a las pulgadas de mercurio, en el proceso de desgasificación es importante en un porcentaje del 10%, ya que se ve afectada la resistencia a la tensión por las microcavidades o burbujas, que se puedan quedar por la falta de vacío.

4. CONCLUSIONES

Podemos observar los resultados en la figura 3 y tabla 4. el porcentaje de importancia de cada uno de las operaciones que se realizan durante el proceso, y que son críticos para las variables dependientes, según el despliegue de la función de la calidad. Por consiguiente, las variables de entrada en orden de importancia para el proceso son: revoluciones por minuto de la propela, tiempo de mezclado, pulgadas de mercurio de vacío.

El tiempo de curado, nos indica importancia de 8%, esto da pauta, para posteriores investigaciones y saber cuál es el tiempo necesario y suficiente para llegar a sus propiedades mecánicas óptimas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Akao, Y. (1993). *Despliegue de Funciones de Calidad (QFD): Integración de necesidades del cliente en el diseño del producto*. Madrid: TGP Hoshin Ediciones, S. L.
- Alcaide, M. J., Diego, M. J., & Artacho, R. M. (2004). *Diseño de producto, métodos y técnicas*. Valencia, España: Alfaomega.
- Arana, D., & López, E. (2008). Desarrollo de una formulación para la elaboración de bloques de resinas de poliuretano para maquinado de prototipos. *Cuadernos de Investigacion EAFIT*, 87.
- Correia, C., Bordado, J., & Clarke, J. (2005). Síntesis y caracterización de nuevos poliuretanos. *5to seminario y mini Foro Iberoamericano de Tecnologías de los materiales*. Cuba.
- Davis, D. L. (s.f.). *Introduction to total Quality*. Merrill.
- Escorsa, P., & Valls, J. (2003). *Tecnología e innovación en la empresa*. Barcelona: Ediciones UPC.
- González de la Campa, J. (2007). Polímeros Avanzados. *Nuevos Materiales en la sociedad del siglo XXI*, 31.
- Gregori, B. S., Alba, L., Brown, A., Fernández, M., Moura, J., De la Hoz, Y., & Alvarez, A. (2007). Los Poliuretanos Biodegradables. Estudio Bibliográfico de su Síntesis y Aplicaciones. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, 3-9.
- Handbook, A. I. (1989). *Machinability Test Methods*. ASM International.
- International, A. (2017). *Annual Book of ASTM Standards*. Nueva York, N.Y.: ASTM International.
- Markusch, P. (1997). *Synthesis of Polyurethane Elastomers*. Pennsylvania: Bayer Corporation Polyurethane Division, Elastomers: 1 Pittsburgh.
- Mc, C. (28 de agosto de 2004). *La industria del poliuretano enfrenta desafíos en la producción global de calzado*. Obtenido de www.polyurethane.org
- N Sheikh, A. K. (2000). Isocyanate-terminate urethane prepolymer as bioadhesive base material: synthesis and characterization. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 299-304.
- Price, G. J., Lennz, E. J., & Ansell, C. W. (2002). The effect of high intensity ultrasound on the synthesis of some polyurethanes. *European Polymer Journal*, 38(8).
- R. Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Missouri: International Thomsom.
- Stokes K, M. V. (1995). Polyurethane elastomer biostability. *Biomater*, 321.35.

Efecto de un vidrio reflectivo sobre el desempeño térmico de una ventana bajo condiciones climáticas de Ciudad Juárez Chihuahua, México

Samanta López Salazar*, E. Simá*, F. Cruz-Flores*

* Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP, 62490, México
(e-mail:samanta.lopez.salazar@gmail.com, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx, filiberto.cruz.flores@gmail.com)

Resumen: El elevado nivel de transmitancia y baja resistencia térmica de la ventana de vidrio claro convencional provoca pérdidas/ganancias de energía no deseadas en la edificación, esto impacta en el consumo eléctrico destinado al aire acondicionado para mantener condiciones de confort térmico, además de la emisión de CO₂ al ambiente. Debido a esto, es conveniente cambiar el diseño de la ventana y enfocarse principalmente en el tipo de vidrio. En este trabajo se analizó el efecto de incorporar un vidrio reflectivo en una ventana de vidrio simple y dos configuraciones de vidrios múltiples: doble y triple, bajo las condiciones climáticas del día con mayor y menor temperatura en Ciudad Juárez, Chihuahua. La incorporación de un vidrio reflectivo provocó un incremento en la temperatura de la ventana y la ganancia/pérdida de energía. En el día con menor temperatura, el vidrio reflectivo redujo la pérdida de energía entre 3 y 94%, mientras en el día con mayor temperatura, aumentó la ganancia de energía no deseada entre 15 y 45% con respecto a las configuraciones de vidrio claro. La configuración de vidrio triple con vidrio reflectivo exterior presentó tendencias de temperatura y flujo de calor por unidad de superficie con fluctuaciones leves; las condiciones ambientales no afectaron significativamente el comportamiento térmico de la ventana, además redujo el costo por consumo eléctrico y emisión de CO₂ hasta 77%, mientras el vidrio doble con vidrio reflectivo (C4) los redujo en 71%.

Palabras clave: vidrio reflectivo, vidrios múltiples, transferencia de calor conjugada, evaluación térmica, estudio transitorio.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las personas buscan estrategias para ahorrar energía, sobre todo en las edificaciones, donde realizan actividades el 90% del día. Ahorrar energía significa reducir las necesidades energéticas de una edificación mediante el uso de sistemas eficientes con un balance positivo de costo – beneficio, es decir el ahorro de energía no debe desencadenar otros problemas o impactar en la comodidad de los usuarios. La comodidad de una persona con su ambiente interior se establece con base en tres parámetros: el ruido, la calidad de iluminación y la temperatura; para que estos factores estén en niveles aceptables se requieren sistemas lumínicos eficientes y sistemas aislados acústica y térmicamente [1].

Para que la edificación tenga un aislamiento térmico eficiente es necesario evaluar cuidadosamente las características de los elementos de apertura: puertas y ventanas. En específico, las ventanas tienen la misión de ventilar la edificación y permitir la vista hacia el exterior; si no hubiera ventanas la salud física y mental de los usuarios estaría comprometida, por lo tanto, las ventanas son elementos indispensables que no pueden o deben omitirse. Una opción viable para no sacrificar ningún aspecto de la edificación es contar con ventanas con un alto nivel de aislamiento, es decir, que tengan la capacidad de mantener una

diferencia considerable entre la temperatura del ambiente interior con el exterior o viceversa. El nivel de aislamiento de una ventana se basa en tres factores principales: el tipo y los materiales de la ventana, el nivel de hermeticidad y, por último, el tipo de vidrio.

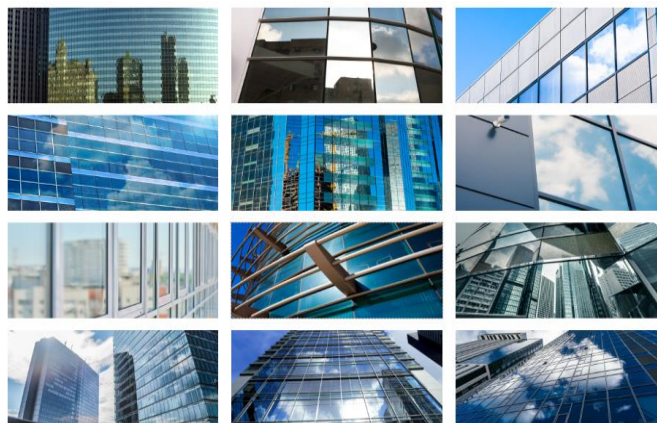


Figura 1. Vidrios reflectivos incluidos en la fachada de edificios en México [Fuente: blog Megaglas, 3].

El uso de un tipo de vidrio diferente al vidrio claro (vidrio convencional) supone una reducción considerable de la

ganancia/pérdida de energía a través de ventana debido a sus propiedades ópticas. Además, si se utilizan en ventanas de vidrios múltiples la reducción será mayor. La conveniencia de ciertos parámetros de diseño de ventanas depende de tres cosas: el clima de la región, la orientación de la fachada y el objetivo de la ventana [2]; si el objetivo de la ventana es la vista exterior, sin sacrificar el aspecto térmico, lo más recomendable es utilizar vidrios reflectantes.

Los vidrios reflectantes o «reflecta» son ideales para paredes exteriores porque pueden usarse como decoración y proteger el interior de los rayos ultravioleta. Además, como se puede apreciar en la Figura 1, por su alta reflectividad, el edificio y el entorno están integrados, por lo que tiene un valor estético adicional [3]. No obstante, su principal función es controlar el calor excesivo reflejando la energía solar incidente y absorbiendo el calor.

En 2015, *Aguilar et al.* [4] desarrollaron un estudio numérico para evaluar el efecto de diferentes tipos de vidrio en el desempeño térmico de una ventana de vidrio doble reversible bajo condiciones de clima cálido y frío. Se analizaron tres configuraciones de vidrio (C1) claro, (C2) absorbente y (C3) reflectivo. En clima frío la combinación de vidrios claros alcanzó el mayor ahorro energético (10 y 28.5% superior a las configuraciones C2 y C3), no obstante, en clima cálido los resultados fueron inversos. Por otro lado, la combinación de vidrio claro con vidrio reflectivo presentó el mejor ahorro combinado de energía para ambos climas (\$17.64 USD). Más tarde, *González – Julián et al., 2018* [5] evaluaron el comportamiento térmico de una ventana de vidrio doble con vidrios: claro, de baja emisividad y reflectivo, bajo las condiciones climáticas de Chetumal Quinta Roo; en comparación con la ventana convencional de vidrio simple la combinación de vidrio claro + aire + vidrio reflectivo redujo la ganancia de energía hasta 72.6%, además permitió obtener el mayor ahorro energético \$30.73 USD con un periodo de recuperación de 3.5 años. Recientemente, *Gorantla et al., 2021* [6] determinaron la configuración de vidrio triple con diferentes colores de vidrio reflectivo (bronce, verde, gris, azul zafiro y oro) que disminuyó la demanda de calefacción y enfriamiento de un edificio en Nagpur, India. En total, se analizaron 60 configuraciones de vidrio en ocho orientaciones. La configuración más eficiente fue: gris + aire + verde + aire + oro en la orientación sureste; esta configuración redujo el gasto por aire acondicionado \$17 USD y tuvo un retorno de inversión de 2.2 años.

Con base en la información reportada en la literatura, se concluyen dos cosas: (1) se recomienda utilizar el concepto de ventana reversible con vidrio claro – reflectivo en regiones con temporadas de bajas y altas temperaturas, no obstante (2) el ahorro anual depende del tipo de vidrio en contacto con el ambiente exterior, este es un parámetro determinante en la demanda de energía, entre menor sea la transmitancia del vidrio exterior mayor será el ahorro energético. Por lo anterior, en este

trabajo se presenta el análisis del efecto de un vidrio reflectivo (en la posición exterior) en ventanas de uno, dos y tres vidrios bajo condiciones climáticas extremas del día con menor y mayor temperatura en Ciudad Juárez, Chihuahua (BWh) en 2022; se analiza el desempeño térmico y el potencial de mitigación de la emisión de CO₂.

2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

En la Figura 2 se muestran las configuraciones de ventana que se analizan en este trabajo, en el caso de los vidrios múltiples el vidrio reflectivo se colocó en la posición más cercana o en contacto con el ambiente exterior.

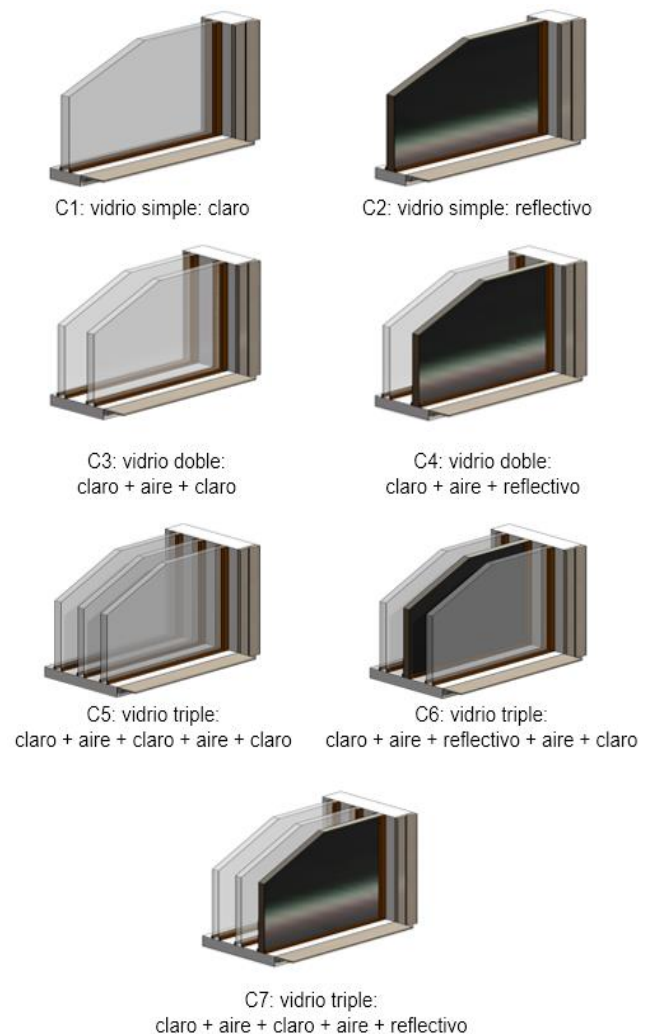


Figura 2. Configuraciones de ventana con vidrio claro y reflectivo.

2.1. Modelo físico

Como se muestra en la Figura 3a, la ventana está conformada por una o más hojas de vidrio de 0.004m y 0.8m de altura, separadas por capas de aire de 0.01 (vidrio triple) y 0.02m (vidrio doble). Los mecanismos de transferencia de calor presentes en la

ventana y considerados en el modelo son: conducción de calor a través de paredes semitransparentes, convección natural en el aire encapsulado e intercambio radiativo entre las superficies que encierran al fluido (ver Figura 3b). Las propiedades termofísicas del aire en las cavidades y los vidrios (claro y reflectivo) fueron extraídas de [5].

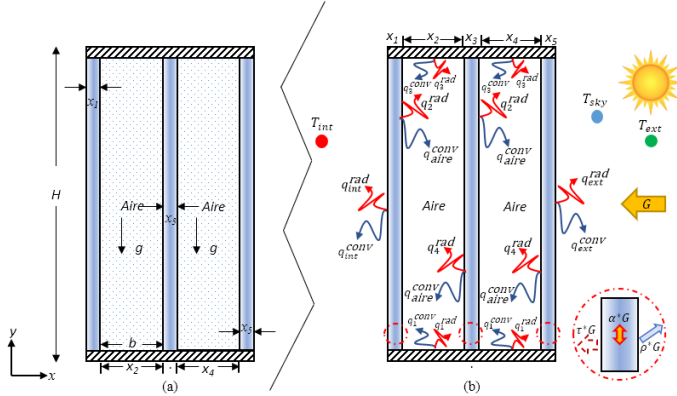


Figura 3. Modelo físico de una ventana de vidrio triple (a) dimensiones y (b) mecanismos de transferencia de calor.

2.2. Consideraciones

- Debido a las dimensiones de la ventana y la diferencia de temperaturas que puede existir, el flujo se considera en régimen laminar.
- Las paredes horizontales, superior e inferior, se consideran adiabáticas.
- El fluido, en este caso aire, es newtoniano e incompresible.
- Se considera aire seco, por lo tanto, es un medio radiativamente no participante.
- Las propiedades termofísicas se consideran constantes, con excepción de la densidad en el término de flotación (aproximación de Bussinesq) en la ecuación de cantidad de movimiento en dirección y .

2.3. Modelo matemático

Los modelos matemáticos que describen los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección son en estado transitorio y en dos dimensiones. El modelo de convección natural para el fluido encapsulado lo representan las ecuaciones de Navier-Stokes (Ecs. 1 – 3) y la ecuación de la energía, Ec. (4).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} \\ + \rho g \beta (T - T_{\infty}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p v T)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Por otro lado, el modelo de conducción de calor en paredes semitransparentes se representa por la Ec. (5), donde: $\theta(x) = G \cdot \exp[-S_g(x_{\text{vidrio}} - x)]$ es la función de atenuación de energía por absorción y dispersión, G es la radiación incidente en el vidrio antes de penetrarlo, S_g es el coeficiente de atenuación del vidrio y x_{vidrio} corresponde al espesor del vidrio.

$$\frac{\partial(\rho C_p T_g)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta(x)}{\partial x} \quad (5)$$

Por otra parte, se realizó un balance de energía radiativo para considerar el intercambio radiativo entre las superficies que encierran el fluido, en el balance se establece la diferencia entre la radiación que sale de una pared y la que llega a dicha pared, Ec. (6).

$$q_{r,k}(r_k) = q_{o,k}(r_k) - q_{i,k}(r_k) \quad (6)$$

La transferencia de calor conjugada se relaciona a través de las fronteras verticales del sistema. De manera que, las condiciones de frontera térmicas que se representan en el fluido encapsulado se representan por las Ecs. (7) y (8), mientras las condiciones de frontera hidrodinámicas son de no deslizamiento, es decir, velocidades igual a cero.

$$\begin{aligned} \text{Para } 0 \leq y \leq Hy \\ \text{cavidad (1)} \quad q_{\text{vidrio}}^{\text{cond}} = q_{\text{aire}}^{\text{conv}} + q_2^{\text{rad}}, x = x_1 \\ q_{\text{aire}}^{\text{conv}} = q_{\text{vidrio}}^{\text{cond}} - q_4^{\text{rad}}, x = (x_1 + x_2) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Para } x_1 < x_2 \\ q_1^{\text{conv}} = -q_1^{\text{rad}}, y = 0 \\ q_3^{\text{conv}} = -q_3^{\text{rad}}, y = Hy \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Para } 0 \leq y \leq Hy \\ \text{cavidad (2)} \quad q_{\text{vidrio}}^{\text{cond}} = q_{\text{aire}}^{\text{conv}} + q_2^{\text{rad}}, x = (x_1 + x_2 + x_3) \\ q_{\text{aire}}^{\text{conv}} = q_{\text{vidrio}}^{\text{cond}} - q_2^{\text{rad}}, x = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \\ \text{Para } (x_1 + x_2 + x_3) < x < (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \\ q_1^{\text{conv}} = -q_1^{\text{rad}}, y = 0 \\ q_3^{\text{conv}} = -q_3^{\text{rad}}, y = Hy \end{aligned} \quad (8)$$

De acuerdo con la Figura 3b, el vidrio 1 es el vidrio en contacto con el ambiente interior a una temperatura constante ($T_{\text{int}}=25^\circ\text{C}$), mientras el vidrio 3 está sometido a las condiciones ambientales exteriores: temperatura ambiente (T_{ext}), velocidad del viento

(V_{aire}) y radiación solar (G). La radiación solar que incide sobre la superficie del vidrio exterior, componente normal, se refleja, se absorbe y se transmite a través de los vidrios en diferentes proporciones de acuerdo con las propiedades ópticas del vidrio reportadas por [5]. La energía que absorben los vidrios propicia un cambio en su temperatura lo que provoca transferencia de calor por convección y radiación al interior y exterior del sistema, Ec. (9) y (10). Los coeficientes de transferencia de calor por convección al interior y exterior de la ventana fueron tomados de [7]; el coeficiente de transferencia de calor por convección al interior se considera constante, 2.5 W/m^2 , mientras el h_{ext} se calcula en función de la velocidad del viento; la temperatura de cielo (T_{sky}) se calculó mediante la correlación reportada por [8].

$$-\lambda \frac{\partial T_{g1}}{\partial x} = h_{int}(T_{int} - T_{g1}) + \varepsilon_{g1} \sigma(T_{int}^4 - T_{g1}^4) \quad (9)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_{g3}}{\partial x} = h_{ext}(T_{g3} - T_{ext}) + \varepsilon_{g3} \sigma(T_{g3}^4 - T_{sky}^4) \quad (10)$$

3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN NUMÉRICA

El código numérico para resolver las ecuaciones gobernantes de flujo de fluidos y transferencia de calor se desarrolló en fortran. Los modelos matemáticos se discretizaron con el método de volumen finito. El acople de las ecuaciones de Navier-Stokes se realizó con el algoritmo SIMPLEC con un esquema de interpolación híbrido para los términos advectivos y un esquema centrado para los difusivos, el término transitorio se discretizó con un esquema completamente implícito. Después de realizar un estudio de independencia de malla temporal y espacial, se seleccionó una malla de 11×91 nodos para los vidrios y 21×91 nodos para las cavidades llenas de aire, mientras el paso de tiempo para llevar a cabo el modelado numérico fue de 15s. Con respecto a la una malla más fina y un paso de tiempo pequeño, los resultados de temperatura y flujo de calor por unidad de superficie presentan diferencias menores a 3%.

Se modeló la transferencia de calor conjugada en una ventana de vidrio doble compuesta por vidrio claro + aire + vidrio reflectivo, configuración que reportan [5], con el objetivo de verificar que el código numérico desarrollado resuelve correctamente la transferencia de calor en ventanas con vidrio reflectivo. En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al flujo de calor por unidad de superficie: convectivo, radiativo, y total hacia el interior. Cuantitativamente los resultados presentan una diferencia porcentual máxima de 1.15%, por lo tanto, el código numérico es aceptable y capaz de modelar la transferencia de calor en las configuraciones de ventana propuestas para este trabajo.

4. RESULTADOS

Se llevó a cabo la modelación numérica de siete configuraciones de ventana bajo las condiciones climáticas del día con menor y mayor temperatura del año 2022 en Ciudad Juárez, Chihuahua;

el día se eligió con base en la temperatura exterior. De acuerdo con la clasificación de Köppen, Ciudad Juárez posee un clima BWh, clima desértico con inviernos templados y veranos calurosos [9]. Los datos climáticos (temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar) fueron obtenidos de la página web de la Comisión Nacional del Agua [10]. La temperatura de confort al interior para ambos días se fijó en 25°C .

La temperatura más baja del año fue -7.9°C el 04 de febrero, mientras la más alta fue 46.1°C , el 11 de junio. La radiación solar en la orientación sur para el día con menor y mayor temperatura del año fue: 663.5 y 323.7 W/m^2 , respectivamente. La diferencia en los niveles de radiación solar, en específico en la orientación sur, se debe en principio a la inclinación del sol en las diferentes temporadas del año. La velocidad del viento se mantuvo en el intervalo: $0.0 - 2.4 \text{ m/s}$ en el día con menor temperatura y $0.0 - 4.5 \text{ m/s}$ en el día con mayor temperatura.

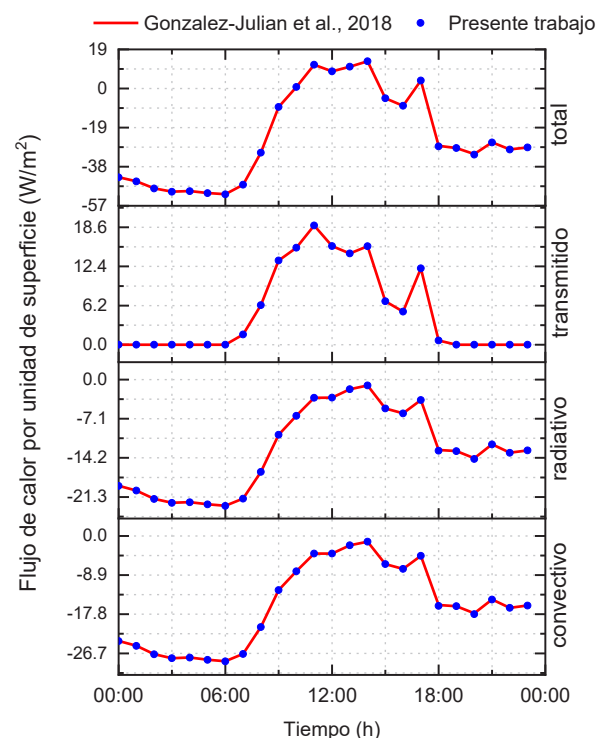


Figura 4. Verificación del código numérico, resultados con respecto a Gonzalez-Julian et al., 2018 [5].

En el día con menor temperatura, Figura 5, se presentan claras diferencias entre las líneas de tendencia de temperatura durante las primeras y últimas horas del día, debido al incremento de la resistencia térmica de la ventana por el aumento de las capas de vidrio y aire. En presencia de radiación solar, la diferencia entre configuraciones se vuelve más notoria debido a las propiedades ópticas de cada configuración. No obstante, las configuraciones de vidrio doble (C3 y C4) tienen un comportamiento térmico similar durante prácticamente todo el día, con apenas 1°C de diferencia en la hora pico de temperatura y radiación solar a las 12:40h. Muy cercano al comportamiento descrito para las

configuraciones de vidrio doble, esta la configuración de vidrio triple con vidrio reflectivo exterior (C7), con menos de 0.5°C de diferencia con respecto a los vidrios dobles. Las configuraciones C3, C4, y C7 presentan la menor fluctuación de temperatura en este día, además, permanecen cercanas a la temperatura de confort fija al interior: 23.6 , 24.6 y 24.9°C , respectivamente. El peor desempeño térmico en términos de temperatura lo tiene la configuración de vidrio triple con vidrio reflectivo intermedio (C6) y el vidrio simple claro (C1), debido a que tienen diferencias de hasta 11.9°C y 12.2°C con respecto a la temperatura de confort al interior. Entre menor diferencia de temperatura exista entre el ambiente interior y la superficie de la ventana, menor será la pérdida o ganancia de energía que provoque a la edificación, por otro lado, si la transmitancia del sistema es baja, la ganancia de energía debido a la incidencia de radiación solar no tendrá un efecto significativo sobre el flujo de calor por unidad de superficie total hacia el interior (ver Figura 6).

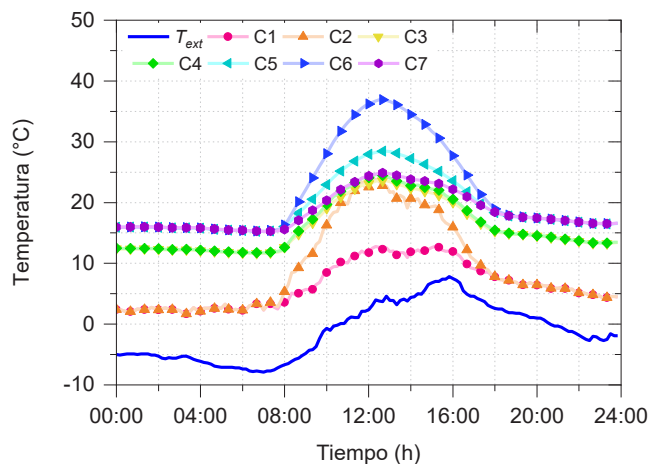


Figura 5. Temperatura de la superficie interna de la ventana, día con menor temperatura.

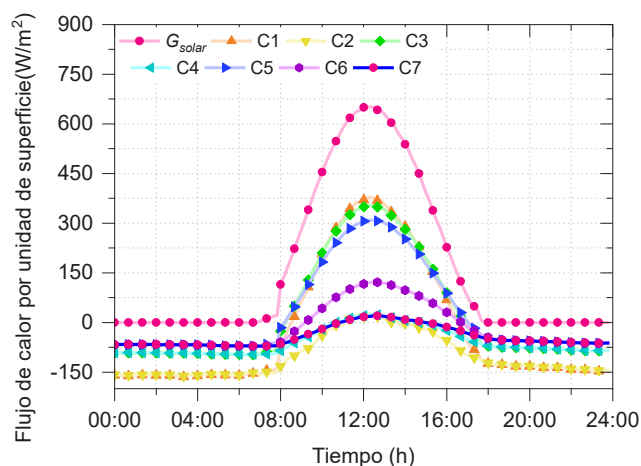


Figura 6. Flujo de calor por unidad de superficie total hacia el interior, día con menor temperatura.

En el día con menor temperatura, las configuraciones de vidrios claros (C1, C3 y C5) presentan el valor más alto del flujo de calor por unidad de superficie: 378 , 353.4 y 309.6 W/m^2 , respectivamente. A excepción de la configuración C6, las configuraciones con vidrio reflectivo no presentan fluctuaciones notorias en el flujo de calor por unidad de superficie durante todo el día, el valor más alto del flujo de calor por unidad de superficie para las configuraciones C2, C4 y C7 fue: 26.6 , 24.3 y 20 W/m^2 . En el día con menor temperatura, la temperatura exterior fue inferior a 25°C , por esto la ventana pierde energía en las fronteras, estas pérdidas se reflejan como cantidades negativas en el flujo de calor por unidad de superficie hacia el interior. Debido a que la diferencia entre el tipo de vidrio se aprecia únicamente en presencia de radiación solar, el valor más bajo del flujo de calor por unidad de superficie fue: -164 , -97 y -72 W/m^2 en el vidrio simple, doble y triple, respectivamente.

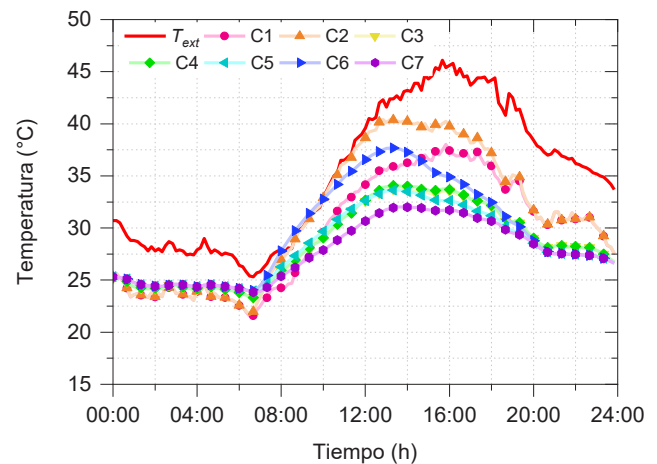


Figura 7. Temperatura de la superficie interna de la ventana, día con mayor temperatura.

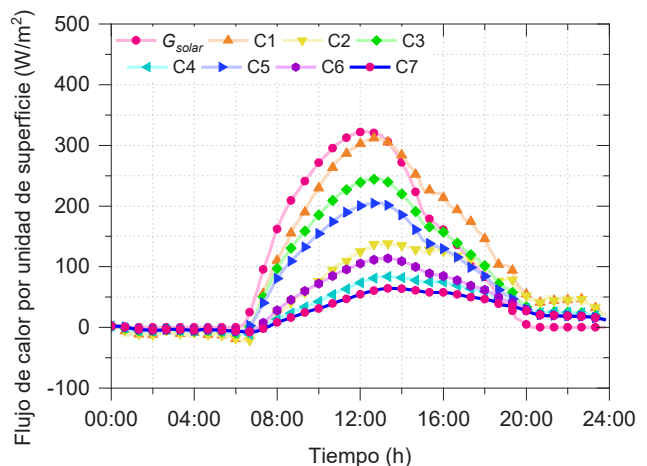


Figura 8. Flujo de calor por unidad de superficie total hacia el interior, día con mayor temperatura.

En ausencia de radiación solar, la diferencia en el flujo de calor por unidad de superficie entre configuraciones se relaciona con la resistencia térmica de la ventana, que es producto del nivel de aislamiento térmico. Entre mayor sea el número de capas de aire y vidrios, mayor será el nivel de aislamiento.

En el día con mayor temperatura, se presentan ganancias de energía hacia el ambiente interior debido a la diferencia de temperaturas y la incidencia de radiación solar sobre la ventana. Como se puede observar en la Figura 7, la mayor parte del día la ventana tiene una temperatura mayor a 25°C. Los valores más altos de temperatura se presentan de las 12:00 – 16:00h cuando la radiación solar y la temperatura exterior alcanzan sus niveles más elevados. La temperatura más alta de las siete configuraciones fue 40.4°C con la configuración C2, seguida de C1 con 38°C, y C6 con 37.7°C, mientras las configuraciones restantes estuvieron en el intervalo de temperatura de 32 – 34°C. Debido a la baja absorción de energía de la configuración C7, por la colocación de un vidrio reflectivo en el exterior de un sistema de triple acristalamiento, que además reduce la transmisión de energía y aumenta la resistencia térmica, la temperatura de la ventana no tuvo fluctuaciones de temperatura durante el día y se mantuvo en el intervalo: 23.8 – 32°C.

En la Figura 8, se presenta el comportamiento del flujo de calor por unidad de superficie en el día con mayor temperatura, nuevamente las configuraciones de vidrio claro presentaron los valores más elevados del flujo de calor por unidad de superficie total: 312.3, 245.0 y 205.3 W/m² en C1, C3 y C5, respectivamente. A estas configuraciones le siguen C2, C6 y C4 con: 139.3, 113.9 y 84.0 W/m², respectivamente; la configuración C7 nuevamente presentó el valor más bajo del flujo de calor por unidad de superficie: 64.3 W/m². En ausencia de radiación solar hubo pequeñas pérdidas de energía, tendencias por debajo del eje 0 en la Figura 8, estas fueron: -24.0, -11.8 y -7.9 W/m² en las configuraciones de vidrio simple, doble y triple, respectivamente.

El flujo de calor por unidad de superficie total es el producto de la suma del flujo de calor por convección, radiación (debido a la diferencia de temperaturas) y el flujo de calor transmitido debido a la incidencia de la radiación y las propiedades ópticas del vidrio como pared semitransparente. En el día con menor temperatura, en invierno, el aumento en el flujo de calor total se debe directamente a la radiación solar, mientras en el día con mayor temperatura el flujo de calor se debe en parte a la radiación solar, además del aumento de la temperatura exterior. El uso de vidrios reflectivos en verano produce un aumento en la temperatura de la ventana, por lo que, la ganancia por convección y radiación aumenta, no obstante, debido a la transmitancia del vidrio reflectivo (7.7%) y el uso de vidrios múltiples el flujo de calor total es bajo.

En la Figura 9, se muestran los resultados de la integración numérica del flujo de calor por unidad de superficie hacia el interior para conocer la energía requerida para mantener la

temperatura interior en 25°C. Posteriormente, estos resultados se utilizaron para obtener el costo por consumo eléctrico (Tarifa 1-CFE) y la emisión de CO₂, para este último se utilizó el factor de emisión de electricidad del año 2021: 0.423 tCO₂e/MWh, publicado por la Secretaría de medio ambiente y recursos naturales en México (ver Tabla 1).

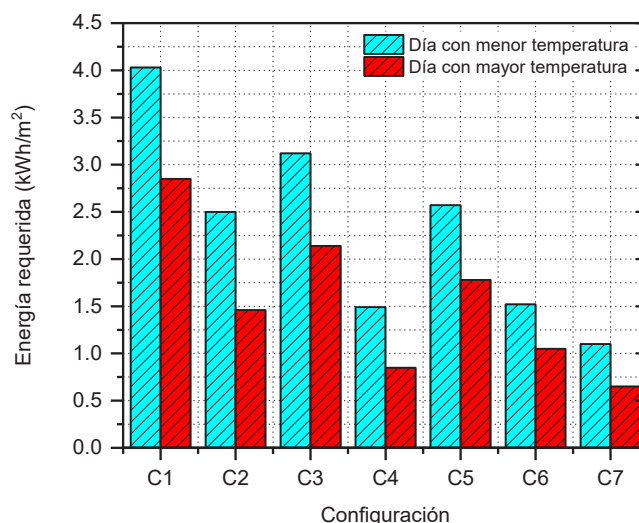


Figura 9. Energía total requerida para mantener condiciones de confort térmico.

De acuerdo con la Tabla 1, el menor CCE y emisión de CO₂ se obtiene con la implementación de un vidrio reflectivo en las configuraciones de vidrios múltiples, en donde el CCE no supera \$50 MXN.

Tabla 1. Costo por consumo eléctrico y emisiones de CO₂ en el mes con menor y mayor temperatura.

Caso	Mes con menor temperatura, febrero		Mes con mayor temperatura, junio	
	CCE* (\$ MX)	eCO ₂ (kgCO ₂ e/m ²)	CCE* (\$ MX)	eCO ₂ (kgCO ₂ e/m ²)
C1	130.8	52.8	87.7	37.3
C2	74.8	32.8	43.5	19.1
C3	93.1	40.9	63.9	28.1
C4	44.4	19.5	25.4	11.2
C5	76.7	33.7	53.2	23.4
C6	45.3	19.9	31.3	13.7
C7	32.8	14.4	19.5	8.5

*CCE: Costo por consumo eléctrico, Tarifa 1 CFE-México 2023 [11].

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el efecto de un vidrio reflectivo sobre el desempeño térmico de una ventana compuesta por una, dos y tres capas de vidrio bajo las condiciones del día con menor y mayor temperatura en Ciudad Juárez, Chihuahua. Con base en los resultados de la modelación numérica de la transferencia de

calor conjugada, en dos dimensiones y en estado transitorio, se concluye lo siguiente:

- El vidrio claro deja pasar el 80% de la radiación solar que incide sobre la superficie, por lo tanto, las configuraciones de ventana con vidrios claros presentaron los valores más elevados de ganancia de energía, consumo eléctrico y emisión de CO₂.
- En el día con menor temperatura, la configuración C2 redujo el flujo de calor por unidad de superficie hacia el interior: 327 y 283 W/m² con respecto a las configuraciones de vidrios múltiples con vidrios claros. No obstante, en el día con mayor temperatura esta configuración alcanzó 40.4°C y un flujo de calor por unidad de superficie de 139 W/m², donde el 88% de este resultado se desprende de la ganancia de energía por convección y radiación debido al aumento de la temperatura.
- Aunque la transmitancia del vidrio es un factor que determina el desempeño térmico de la ventana, también es necesario considerar la absorptancia. El vidrio reflectivo absorbe 62.2% de la radiación solar que incide sobre la superficie, esto provocó un incremento en la temperatura del vidrio, i.e. el vidrio simple reflectivo alcanzó 40.4°C, mientras el vidrio simple claro alcanzó 38°C.
- La ventana con la configuración C7 presentó tendencias de temperatura y flujo de calor por unidad de superficie con fluctuaciones leves, por lo tanto, las condiciones ambientales no afectaron significativamente el comportamiento térmico de la ventana. Esto se reflejó en el costo por consumo eléctrico y emisión de CO₂: \$19.5 MXN y 8.5 kgCO₂e/m², respectivamente.
- En ambos días el peor desempeño térmico lo presentó la configuración de vidrio simple claro, seguido por el vidrio doble claro, la configuración C5 y C2 tuvieron un desempeño térmico similar, no obstante, con respecto al vidrio triple C2 redujo el consumo energético 18%. Así mismo y debido a la similitud de ambas configuraciones, el vidrio doble con vidrio reflectivo y el vidrio triple con vidrio reflectivo intermedio presentaron resultados similares, sin embargo, C4 redujo el consumo de energía y la emisión de CO₂ 23% más que la configuración C6.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Realizar un análisis costo – beneficio, debido a que en cuatro casos las configuraciones tuvieron un desempeño térmico similar y para proporcionar conclusiones a favor de cada una de ellas es necesario evaluar los costos de inversión, operación y mantenimiento, debido a la diferencia entre los materiales, estructura y diseño de las configuraciones de ventana reportadas en esta trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Abadía, L. (2020, 27 octubre). Interacción de parámetros térmicos, acústicos y lumínicos en el diseño de la envolvente arquitectónica. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/16682>
- [2] La función de la ventana . (2017, 10 junio). Vivienda Saludable. <https://www.viviendasaludable.es/confort-bienestar/aislamiento-termico/la-funcion-de-la-vent>
- [3] Vidrio reflecta, características y ventajas, Megaglass. <https://www.megaglass.com.mx/blog/vidrio-reflecta/>
- [4] Aguilar J. O., Xamán J., Álvarez G., Hernández-Pérez I., López-Mata C., Thermal performance of a double pane window using glazing available on the Mexican market. Renewable Energy, Vol. 81, Págs. 785-794, 2015.
- [5] González-Julián E., Xamán J., Nelson O. M., Chávez Y., Zavala-Guillén I., Simá E., Annual thermal evaluation of a double pane window using glazing available in the Mexican market. Applied Thermal Engineering, Vol. 143, Págs. 100-111, 2018.
- [6] Gorantla, K., Shaik, S., Kontoleon, K. J., Mazzeo, D., Maduru, V. R. & Shaik, S. V. (2021). Sustainable reflective triple glazing design strategies: Spectral characteristics, air-conditioning cost savings, daylight factors, and payback periods. Journal of Building Engineering, 42, 103089.
- [7] Rodriguez-Ake, A., Xamán, J., Hernández-López, I., Saucedo, D., Carranza-Chávez, F. J., Zavala-Guillén, I., Numerical study and thermal evaluation of a triple glass window under Mexican warm climate conditions. Energy, Vol. 239, 2022.
- [8] Swinbank, W. C. Long-wave radiation from clear skies. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 89(381), 339-348, 1963.
- [9] Clima Ciudad Juárez: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Ciudad Juárez - Climate-Data.org. (s. f.). <https://es.climate-data.org/americas-del-norte/mexico/chihuahua/ciudad-juarez-5300/>
- [10] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Septiembre 2022. <https://www.gob.mx/conagua>
- [11] Tarifas. (s. f.). <https://www.cfe.mx/hogar/tarifas>

Estudio de la desalinización en un novedoso sistema de torre solar

S. Moreno*, J. F. Hinojosa*, G. E. Dévora-Isiordia**, V. M. Maytorena*, R. L. Duran*

*Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000
(e-mail: fernando.hinojosa@unison.mx).

**Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Calle 5 de Febrero 818 Sur, Ciudad Obregón, CP 85000, (e-mail: gdevora@itson.edu.mx).

Resumen: En este trabajo se analizó un sistema de torre solar el cual está propuesto como método para desalinizar utilizando energía solar. El sistema experimental fue construido y probado en Ciudad Obregón, Sonora. La base de este trabajo se encuentra en el modelo matemático de esta torre solar, el cual se resolvió por el método de volumen finito con la herramienta computacional ANSYS Fluent. El modelo solo necesita como entrada las condiciones de frontera, es decir, las condiciones ambientales. Se reduce el tiempo de cómputo al no utilizar un modelo multifásico, y en su lugar se hace un acoplamiento de la ecuación de energía con la de especies. Se presenta la validación que se hizo comparando resultados numéricos contra experimentales, además de los contornos de temperatura y los vectores de flujo, así como el cálculo de la eficiencia global del sistema. Se muestra que la torre solar es una alternativa interesante para producir agua, ya que produce 6052 mL por día. Por otra parte, es necesario hacer más estudios y plantear diferentes técnicas o tecnologías para aumentar la cantidad de agua producida y con eso su eficiencia.

Palabras clave: Desalinización, Torre solar, Modelo matemático, Agua, Energía solar.

1. INTRODUCCIÓN

Las sequías, el crecimiento poblacional y la sobreexplotación del recurso de agua ha causado un grave problema como lo es la escasez de agua. Este problema ha sido proclamado uno de los grandes desafíos del siglo 21 (Rees, 2014). Existen dos tipos de escaseces de agua: física que se refiere a la insuficiencia de agua para satisfacer la demanda y económica que se refiere a tener agua, pero hay una falta de inversión para aprovecharla.

Ampliar las opciones para obtener agua es una opción para luchar contra el problema de la escasez. En esta investigación se propone utilizar procesos térmicos para desalinizar agua.

Los procesos de desalación solar se clasifican en directos e indirectos. Los sistemas indirectos solo los cuales el colector solar está separado de la unidad de desalinización. Mientras que en los directos la colección de energía solar y la desalinización suceden en el mismo sistema. Ambos sistemas presentan ventajas y desventajas, por ejemplo, los indirectos presentan una mayor producción de agua, pero para poder utilizarlos se requiere un mayor espacio (Chauhan *et al.*, 2021).

La chimenea solar para desalinización es un novedoso sistema indirecto. Los componentes de este sistema son: a) un contenedor de agua, el cual está situado en el fondo y también tiene el objetivo de colectar la energía solar, b) una cubierta de alta transmitancia, que impida salir la radiación infrarroja y produzca un efecto invernadero, c) una chimenea de tipo circular, con la finalidad de tener la mayor cantidad de pérdidas térmicas posibles. El esquema básico del sistema de desalación de torre solar se muestra en la Fig. 1.

En este sistema, la radiación solar entra por la cubierta y es absorbida en el contenedor de agua, esto provoca que el agua se caliente. Debido al calentamiento y por el equilibrio líquido-vapor se empieza a producir vapor de agua. Por otra parte, hay una abertura a los costados de la torre por donde entra aire. El aire que entra sufre dos efectos, uno de ellos es que se empieza a mezclar con el vapor de agua y el otro efecto es el aumento de temperatura producido al estar en contacto con el agua caliente. El calentamiento del agua genera una disminución en su densidad, lo cual a su vez genera un efecto de flotación. El aire húmedo se desplaza verticalmente por la torre. Al mismo tiempo que el aire va pasando a través de la torre este va perdiendo energía, eso hace que en la cara interna de la torre se logre una

condensación. Finalmente, el agua condensada fluye hacia abajo, por efecto de la gravedad, y es colectado en la parte inferior de la torre.

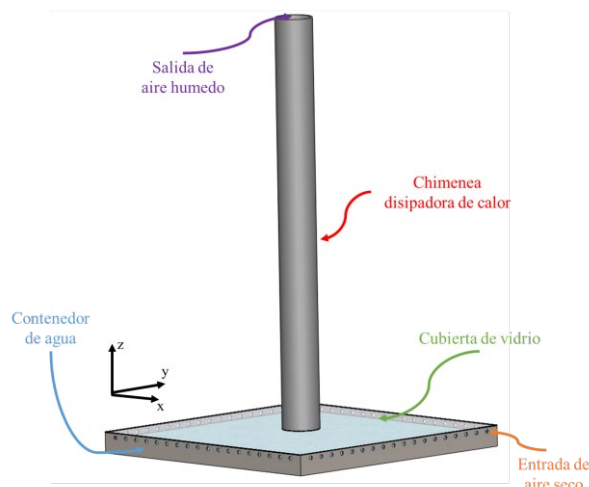


Fig. 1. Esquema básico de la torre solar para desalación.

Anteriormente se han estudiado sistemas de torre solar para obtener agua. (Ming *et al.*, 2016) usaron un absorbedor solar basado en tubos pintados de negro en un arreglo circular, como caracol. El aire que entraba a los tubos, con humedad relativa superior al 60%, aumentaba su temperatura y al pasar por la torre se podía condensar, este sistema tenía la complicación que debía utilizarse en zonas con baja precipitación natural. Con este sistema ellos eran capaces de absorber humedad del aire atmosférico. Mientras que, (Ming *et al.*, 2017) utilizaron un sistema donde atomizaban agua a la entrada de la torre, el aire caliente se mezcla con esas gotas y posteriormente eran condensadas a lo largo de la torre.

Una tendencia diferente para obtener agua utilizando torre solar es colocar destiladores solares convencionales en el espacio entre el suelo y el aire. (Zuo *et al.*, 2011) estudiaron una torre solar de 200 m de alto y 10 m de diámetro y su absorbedor de 250 m y una entrada de aire de 2 m. Con este sistema estimaron una producción de agua de 69462 toneladas al año, considerando un tiempo de operación de 6 horas diarias.

Por otra parte, hay estudios donde hay una producción híbrida de potencia y agua. (Kiwani, Al-Nimr and Abdel Salam, 2018) pusieron una capa de agua de 4 cm de espesor y 30 m de diámetro, es decir el agua no cubría por completo la superficie absorbidora (250 m de diámetro), con esta configuración, ellos lograron una producción anual de 9.95 kWh/m² y 2.43 ton/m² de energía y agua,

respectivamente. Esas producciones representaron una eficiencia de 66%.

De lo anterior mencionado, en este trabajo se estudia la producción de agua en un sistema novedoso de torre solar. Con dimensiones más pequeñas a las reportadas en literatura, lo que lo puede hacer accesible para personas en comunidades costeras de bajos recursos económicos. Hay una falta de entendimiento del fenómeno de transferencia de masa y energía por lo tanto se plantea un modelo matemático es cual es validado con resultados experimentales. Los resultados experimentales se llevaron a cabo al aire libre en la ciudad de Obregón, Sonora.

2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

2.1 Descripción del problema físico

En este trabajo se analizó un sistema de torre solar para desalinización. Las dimensiones del contenedor de agua fueron 2x2 m², el agua dentro de él tenía una altura de 0.1 m, la cual se asumió constante para el modelo. La torre tenía una altura de 3 m y los diámetros internos y externos eran 0.2540 y 0.2635 m, respectivamente. La separación entre la superficie del agua y la cubierta era 0.05 m. Por último, había 18 orificios por lado, por los cuales entraba el aire y estos tenían un diámetro de 0.03 m.

La corrida experimental presentada se llevó a cabo el día 21 de julio del 2021, en Ciudad Obregón, Sonora. Se midieron variables ambientales como radiación global, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento. Además, como resultado, se midió la producción de agua y un perfil de temperatura a lo largo de la torre.

2.2 Modelo matemático

Para plantear las ecuaciones gobernantes se realizaron las siguientes suposiciones:

- El aire se modela como gas ideal.
- La aproximación de Boussinesq es aplicable en el agua.
- El régimen de flujo es turbulento en la torre y laminar en el agua.
- El espesor del vidrio es despreciable.
- El modelo computacional es simétrico, por lo tanto, se modela solo un cuarto de la torre.

Adicionalmente se realiza un acoplamiento entre la ecuación de transporte de especies y la de energía, por medio de la condición de frontera en la ecuación de especies y un término de generación/sumidero en la ecuación de energía.

Con base en lo anterior mencionado, las ecuaciones gobernantes quedaron de la siguiente manera:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}_{eff}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

Ecuación de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{E}) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho \bar{E} + \bar{P})) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla \bar{T} - \sum_j \bar{h}_{E,j} \vec{J}_j) + S_h + S_L \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h + S_L \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h + S_L \quad (5)$$

Las ecuaciones (3)-(5) son para el aire, agua y torre, respectivamente. En las ecuaciones de energía aparecen dos términos de generación volumétrica, primeramente, el término S_h es referente al calor generado debido a la radiación solar, mientras que el término S_L es debido al calor de cambio de fase (condensación y evaporación). Estos términos se calculan de la manera siguiente:

$$S_h = \frac{\alpha_{rad} (I_{global}) A}{V} \quad (6)$$

$$S_L = \frac{(1-\alpha) \dot{m}_c h_{fg,p} A_p - (1-\alpha) \dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_a} \quad (7)$$

$$S_L = -\frac{\alpha \dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_w} \quad (8)$$

$$S_L = \frac{\alpha \dot{m}_c h_{fg,p} A_g}{V_p} \quad (9)$$

Las ecuaciones (7)-(9) son para el aire, agua y torre, respectivamente. En estas aparece el flujo másico de evaporación y condensación el cual permite acoplar la ecuación de energía con la distribución de especies.

Adicionalmente, en el aire, se resuelve una ecuación de transporte de especies, donde las especies son vapor de agua y aire. Este dominio se considera que se encuentra en régimen turbulento, por lo tanto, se utiliza el modelo k-ε RNG.

La eficiencia global del sistema se define como un cociente entre la energía de condensación y la energía solar que está recibiendo el sistema:

$$\eta_{global} = \frac{M_w h_{fg}}{A_w (I_{global})} \quad (12)$$

2.3 Condiciones de frontera

Para simular la torre solar el modelo computacional se dividió en tres dominios: agua, aire y torre. La unión entre un dominio y otro se modela como una pared acoplada, es decir, el calor que sale de un dominio entra por completo al otro y la temperatura es igual en la frontera de ambos.

Las condiciones ambientales, que son variantes con el tiempo, se ajustan a unos polinomios. A la entrada de la torre llega aire a la temperatura ambiental y con cierta humedad. La salida se asume como presión constante a la presión atmosférica.

Los diferentes dominios ganan energía de la radiación solar por medio de los términos fuentes. Y en la parte exterior de la torre se calculan pérdidas por radiación y por convección, además eso se hace en la parte de la cubierta transparente.

En el dominio del aire, las paredes que son frontera con el agua y la torre se consideran con humedad relativa del 100%. Se utilizan las ecuaciones (10)-(13) para encontrar la fracción másica en función de la temperatura, (evaluadas en la temperatura de cada interfaz). Con esto se logra el acoplamiento de la ecuación de especies con la de energía.

$$P_{sat}(T) = P_{cr} \left(10^{K \left(1 - \frac{T_{cr}}{T} \right)} \right) \quad (10)$$

$$K = 4.39553 - 6.2442 \left(\frac{T}{1000} \right) + 9.953 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 5.151 \left(\frac{T}{1000} \right)^3 \quad (11)$$

$$w = 0.622 \frac{\phi P_{sat}}{P - \phi P_{sat}} \quad (12)$$

$$Y = \frac{1}{1 + \frac{1}{w}} \quad (13)$$

2.4 Metodología numérica

Se resolvió el modelo matemático, por medio del método de volumen finito, usando el software ANSYS Fluent v15. Las condiciones de frontera relacionadas con las condiciones ambientales se agregaron al software por medio de una función definida por el usuario, la cual se programa en lenguaje C. Estas condiciones ambientales se muestran la Fig. 2, con sus respectivos ajustes a polinomios, donde en las etiquetas HR y TA significan humedad relativa y temperatura ambiente, respectivamente.

Las propiedades del agua, aire y torre se tomaron al igual que en (Hu *et al.*, 2023) y el algoritmo de solución se muestra en (Moreno *et al.*, 2022).

La malla computación constaba de 1374206 nodos.

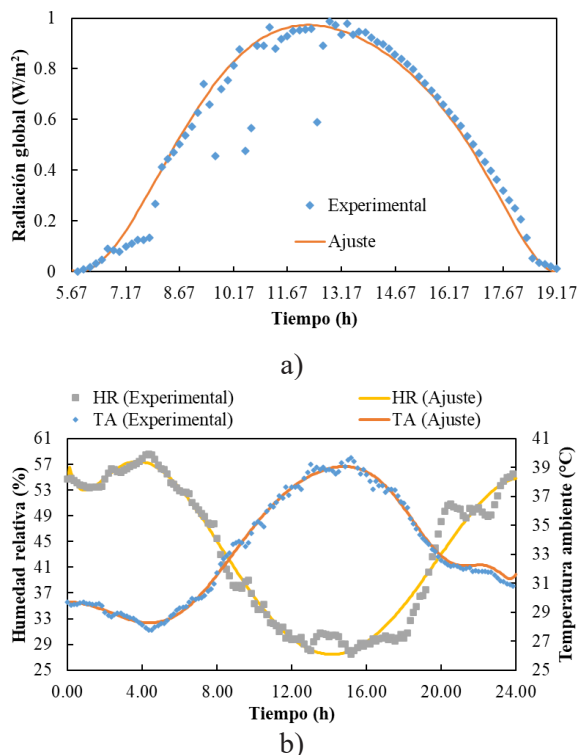


Fig. 2. Condiciones ambientales a) Radiación global, y b) Humedad relativa (eje izquierdo) y Temperatura ambiente (eje derecho)

3. VALIDACIÓN DEL MODELO

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos en el modelo matemático contra los resultados experimentales obtenidos en un estudio anterior.

La evolución de la producción acumulada se muestra en la Fig. 3. De manera experimental, la producción fue medida cada hora utilizando una probeta graduada. Se puede observar que la producción empieza en el lapso de 6 a 7 h, además, la producción dejó de ser significativa después de las 19 h. En la Fig. 3 se observa una buena concordancia entre los resultados numérico y los experimentales. Al final del día, la producción experimental tuvo un valor de 6052 mL, mientras que con la simulación se obtuvo 6044 mL. Se calculó el error relativo porcentual para cuantificar la comparación. Al promediar todos los puntos se el error relativo porcentual medio fue 8.53%. El valor máximo del error (57.87%) se presenta al inicio de la simulación (7 h) donde la producción fue 39 y 16.43 mL, experimental y numérica, respectivamente.

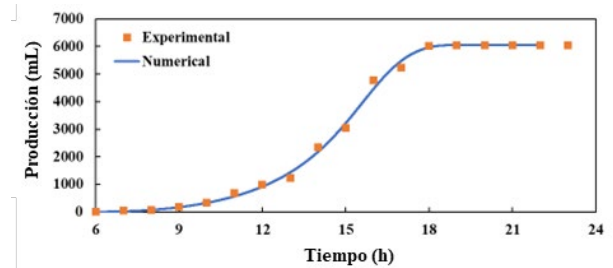


Fig. 3. Evolución de la producción acumulada.

A lo largo de la torre se instalaron 9 termopares para registrar las temperaturas en el interior. En la Fig. 4 se muestran dos perfiles de temperatura, uno para las 13 h y el otro para las 16 h. Los puntos representan la temperatura medida en cada posición y las curvas continuas son los perfiles resultantes del modelo matemático. El comportamiento de los perfiles de temperatura no es lineal, hay una especie de cambio de pendiente lo cual hace parecer que en la parte baja de la torre las diferencias de temperatura son más grandes que en la parte alta. Con respecto a la comparación, ambos perfiles numéricos fueron muy acertados al replicar los resultados experimentales. El promedio del error relativo porcentual dio 1.43 y 0.51% para las 13 y 16 h, respectivamente.

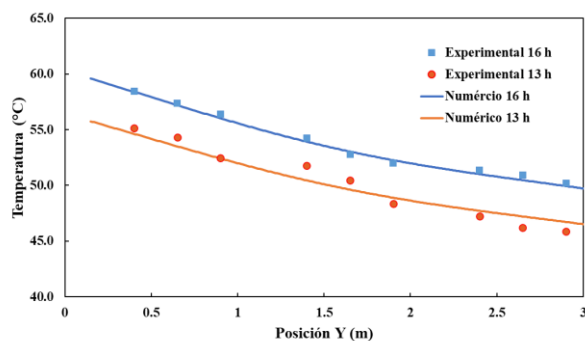


Fig. 4. Perfil de la temperatura interior de la torre.

4. RESULTADOS

El contorno de temperatura para las 16 h se muestra en la Fig. 5. Este contorno es un plano XY es decir una vista lateral desde el plano de simetría. Se puede observar una temperatura uniforme, aproximadamente de 79 °C, en el agua. Se puede ver como a lo largo de la dirección en X el aire va aumentando su temperatura y posteriormente en la torre (dirección Y) fue perdiendo temperatura.

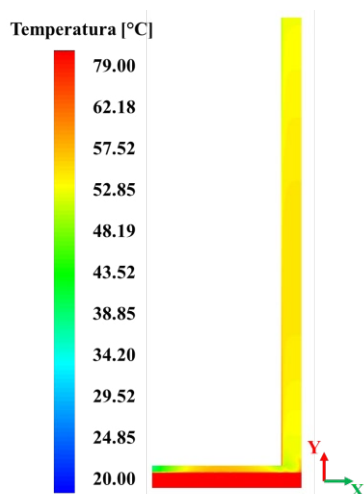


Fig. 5. Contorno de temperatura de la torre solar (vista lateral)

El patrón de flujo del aire se muestra en la Fig. 6. Para este diagrama de vectores se utilizó un plano XZ, colocado a la mitad de la altura de la entrada del aire. En este plano, la velocidad máxima se presenta casi en la entrada de la torre. Se ve claramente que los 18 agujeros por donde entra el aire funcionan de manera correcta para llevar aire hacia la torre, y al mismo tiempo que el aire va haciendo ese recorrido se ve que aumenta su velocidad. En las paredes de simetría (las adyacentes a la entrada de la torre) se ve unos vectores que van en dirección contraria al flujo, esto puede ser debido al choque que se

da en la base de la torre cuando el aire viene de todas direcciones.

Adicionalmente se calculó la eficiencia global del sistema usando la ecuación (12), la cual relaciona la energía para condensar la masa total de agua y la cantidad de energía solar recibida. Para el sistema de torre solar para desalinización la eficiencia es 12.40%. Esta eficiencia no es lejana a la que se obtiene al operar destiladores solares convencionales (Omara, Kabeel and Abdullah, 2017). Pero en destiladores solares existen bastantes estudios sobre tecnologías o técnicas para aumentar su eficiencia (producción), en los cuales esta se incrementa de muy buena manera (Sivakumar and Ganapathy Sundaram, 2013). Esas técnicas pueden ser también aplicadas a la torre solar de desalinización.

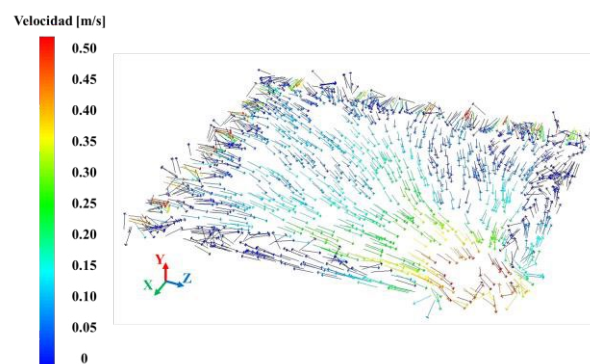


Fig. 6. Vectores de flujo vista isométrica

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados numéricos de usar una torre solar como sistema para desalinizar, usando energía solar como recurso. Lo novedoso de este modelo matemático es que las variables de entrada son las condiciones ambientales, por lo tanto, puede ser utilizado para diferentes días del año y diferentes ciudades. Además, por tener el acoplamiento de las ecuaciones de energía y transporte de especies, se evita utilizar un modelo multifásico de evaporación/condensación, el cual es costoso computacionalmente hablando.

De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- El modelo matemático mostró gran habilidad de replicar los resultados experimentales, por lo tanto, se puede confiar en él.
- La torre solar para desalinización, en su estado actual, presenta producción de agua, aunque su eficiencia es menor en comparación con otros

dispositivos de desalinización que utilizan energía solar.

En general se puede mencionar que es necesario realizar más investigación, con el fin de agregar modificaciones y así aumentar la eficiencia global del sistema.

6. REFERENCIAS

Chauhan, V. K. *et al.* (2021) 'A comprehensive review of direct solar desalination techniques and its advancements', *Journal of Cleaner Production*, 284, p. 124719. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124719>.

Hu, Q. *et al.* (2023) 'Experimental study of desalination using a system integrated by a glass-covered solar collection water basin and a heat dissipating chimney', *Energy Nexus*, 9, p. 100171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100171>.

Kiwan, S., Al-Nimr, M. and Abdel Salam, Q. I. (2018) 'Solar chimney power-water distillation plant (SCPWDP)', *Desalination*, 445, pp. 105–114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.08.006>.

Ming, T. *et al.* (2016) 'Freshwater generation from a solar chimney power plant', *Energy Conversion and Management*, 113, pp. 189–200. doi: [10.1016/J.ENCONMAN.2016.01.064](https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.01.064).

Ming, T. *et al.* (2017) 'Numerical analysis of seawater desalination based on a solar chimney power plant', *Applied Energy*, 208, pp. 1258–1273. doi: [10.1016/J.APENERGY.2017.09.028](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.09.028).

Moreno, S. *et al.* (2022) 'Numerical analysis of a solar still with phase change material under the basin', *Journal of Energy Storage*, 55(July), p. 105427. doi: [10.1016/j.est.2022.105427](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105427).

Omara, Z. M., Kabeel, A. E. and Abdullah, A. S. (2017) 'A review of solar still performance with reflectors', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, pp. 638–649. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.031>.

Rees, J. (2014) 'The water challenge: Presidential Address and record of the Royal Geographical Society (with IBG) AGM 2014', *The Geographical Journal*, 180(3), pp. 274–280.

Sivakumar, V. and Ganapathy Sundaram, E. (2013) 'Improvement techniques of solar still efficiency: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, pp. 246–264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.037>.

Zuo, L. *et al.* (2011) 'Solar chimneys integrated with sea water desalination', *Desalination*, 276(1), pp. 207–213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.052>.

7. NOMENCLATURA

A	Área (m ²)
a	Coefficiente de absorción térmica (1/m)
C_p	Calor específico (W/m K)
D_m	Coefficiente de difusión molecular (m ² /s)
E	Energía (W/m ³)
e	Emisividad (-)
g	Gravedad (m/s ²)
h_E	Entalpía sensible (J/kg K)
h_{fg}	Entalpía de evaporación (J/kg)
I_{global}	Radiación solar global (W/m ²)

L	Longitud (m)
m	Flujo masico (kg/m ² s)
M_w	Masa producida de agua (kg)
P	Presión (Pa)
R_{global}	Radiación solar global (W/m ²)
S_h	Termino fuente por radiación (W/m ³)
S_L	Termino fuente por condensación/evaporación (W/m ³)
T	Temperatura (K)
t	Tiempo (s)
V	Volumen (m ³)
v	Velocidad (m/s)
w	Humedad específica (-)
Y	Fracción másica (-)
λ	Conductividad térmica (W/m K)
μ	Viscosidad (kg/m s)
ρ	Densidad (kg/m ³)
τ	Tensor de esfuerzos de Reynolds (N/m ²)
ϕ	Humedad relativa (-)

Diseño de un exoesqueleto mecánico de miembro superior para el entrenamiento de movimientos en el boxeo

Filiberto Cruz-Flores*, Andrés Blanco-Ortega*,
Samanta López-Salazar*, Rafael Campos Amezcua*, Fabio A. Gómez Becerra**

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-362-7770; e-mail: filiberto.cruz.flores@gmail.com, andres.blanco@cenidet.edu.mx).

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Puerto Vallarta,
Puerto Vallarta 48338, Jalisco, México

Resumen: En este artículo se presenta la propuesta de diseño de un exoesqueleto mecánico enfocado en las trayectorias que genera un boxeador. El dispositivo contará con cinco grados de libertad con base en los movimientos naturales del hombro, codo y antebrazo por lo que será un dispositivo aplicado al miembro superior considerando los tres golpes principales del boxeo: Uppercut, Right hook y Jab. El objetivo de la propuesta de diseño es generar una estructura con las características ideales para obligar al usuario a seguir trayectorias ideales, requiriendo un dispositivo con eslabones y complementos de bajo peso. Se obtuvo un diseño CAD del prototipo del exoesqueleto mecánico bajo las condiciones requeridas para replicar los tres golpes, esto ayudó a visualizar el comportamiento del traje y sus fallas. Teniendo una movilidad aceptable dentro de los rangos de movimiento de las articulaciones estudiadas.

Keywords: Dispositivos robóticos de asistencia, Deporte, Boxeo, Biomecánica.

1. INTRODUCCIÓN

Durante años o siglos las tecnologías como los dispositivos para la asistencia al movimiento de las articulaciones de una persona tomó una mayor relevancia entre la comunidad científica. La manera en cómo una estructura puede inmovilizar, asistir o sustituir la función de ciertas zonas del cuerpo es sorprendente, dispositivos como Férulas, Prótesis u Órtesis son implementados desde la época de los egipcios y pertinentemente actualizados para eventos más actuales como en las guerras o aplicaciones médicas como en rehabilitaciones, sin embargo, existe un dispositivo que asemeja la función del recubrimiento natural de algunos animales (Insectos) denominados exosqueletos. Estos son utilizados para contener los órganos internos del animal y facilitando sus movimientos otorgándoles una mayor resistencia. Dentro de la biomecánica se tiene un traje que asemeja las características de estos animales. “Un exoesqueleto artificial”. Dispositivo que puede considerarse una armadura o exotraje para un usuario con las características de un endoesqueleto como el humano o la mayoría de los animales del planeta dándoles una ergonomía en sus movimientos, así como el aumento o la asistencia controlada de los mismos. En este artículo se desea implementar un exoesqueleto artificial en este caso mecánico, buscando una adaptación liviana y funcional en cuanto al seguimiento de trayectorias mediante motores anclados al dispositivo, por el momento, solo se planea realizar un diseño en un ambiente de dibujo digital con base a los ángulos y

libertades de la fisiología humana. El exoesqueleto mecánico contará con cinco grados de libertad repartidos entre el hombro (3 GDL), el codo (1 GDL) y el antebrazo (1 GDL). Dentro de las aplicaciones de exoesqueletos mecánicos para el deporte, se pueden encontrar dispositivos para Alpinismo [1] y Esquí [2]; ayudando a dar más rendimiento físico y simulando el comportamiento del deporte en condiciones seguras para su entrenamiento. Estos son hasta el momento los únicos dos dispositivos enfocados en el deporte. Por lo tanto, se planea enfocar en una de las disciplinas con mayor relevancia en el mundo “El Boxeo”. En el mundo existen 602 mil 840 boxeadores profesionales activos [3], en México se tiene el 4.63% de ellos lo que representa mas de 27 mil 886 casos de estudios locales. La mayoría de los estudios biomecánicos en deportistas son mediante captura de movimientos o medición de fuerza por golpeo diagnosticando ángulos, velocidades, aceleraciones y cantidad de energía por golpe. Se propone un dispositivo que obligue al usuario a seguir trayectorias antes generadas por deportistas profesionales y mediante la repetición el usuario aficionado logre replicarlas de manera involuntaria y con una presión deseada.

2. CARACTERÍSTICAS DEL MIEMBRO SUPERIOR

Para el desarrollo del dispositivo propuesto se requiere un estudio de los movimientos que genera el hombro, codo y antebrazo. La muñeca y la mano en este caso no son estudiadas por que el boxeador lleva vendada la mano inmovilizándola, a

su vez, usa un guante llamado “Sparring” inmovilizando el movimiento de la muñeca y dándole soporte al vendaje de la mano. Los exoesqueletos mecánicos se pueden aplicar a lo largo del cuerpo, en este caso se planea aplicarlo en el miembro superior (véase fig. 1) dándole el soporte total a la espalda y colocando los movimientos del Hombro – Codo – Antebrazo en la tabla 1 se describe la característica general de la articulación, el tipo y cantidad de movimientos que genera cada una.

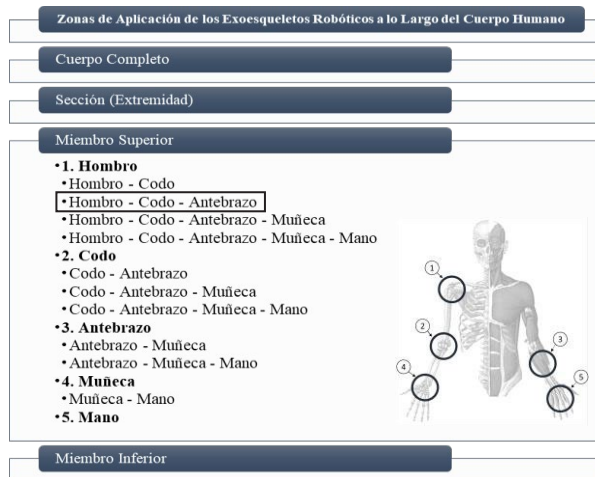


Figura 1. Zonas de aplicación en el miembro superior.

Tabla 1. Descripción por articulación.

Nota: Flexión (F); Flexión / Extensión (F/E); Abducción / Aducción (Ab/Ad); Pronación / Supinación (P/S)

Articulación	Descripción	GDL	Ejes	Movimientos
Hombro	El hombro es la articulación proximal ubicado en el miembro superior del torso del cuerpo. Es la articulación con más movimiento de todas las articulaciones del cuerpo humano.	3	Trasversal	(F/E)
			Anteroposterior	(Ab/Ad)
			Vertical	(F/E)
Codo	El codo es el encargado de realizar la palanca al sujetar un objeto con la mano y posicionarlo con el movimiento de la pronosupinación.	1	Transversal	(F/E)
Antebrazo	El antebrazo genera un movimiento de pronosupinación esta ubicado en el eje longitudinal. Este movimiento necesita la intervención de dos articulaciones: radiocubital proximal y radiocubital distal	1	Longitudinal	(P/S)

3. MODELADO DEL DISPOSITIVO

Sistema mecánico con 5 grados de libertad

Se requiere un exoesqueleto, atado en paralelo al brazo derecho del humano, con uniones y partes que corresponden a las del hombro, codo y antebrazo. En la literatura se encuentran exoesqueletos robóticos grandes y estorbosos y que además demandan una gran cantidad de energía de actuación [4], una gran cantidad de los exoesqueletos para la rehabilitación optan por usar exoesqueletos robóticos anclados [5] [6] para quitar el peso de baterías, pero limita que una persona se desplace. Algunos ocupan guías [7] para personas con problemas en miembros inferiores y hagan la función de marcha, y otros más implementan exoesqueletos robóticos portátiles [8] [9] que son utilizados para la aplicación militar o industrial que necesitan tener un desplazamiento libre, pero aumentan el peso con

baterías y además los actuadores tienen que cargar el peso del usuario y de su misma estructura lo que los convierte en exoesqueletos robóticos grandes. Se propone un exoesqueleto mecánico portátil, con una estructura ligera para el brazo y la espalda, teniendo una agilidad parecida a una prenda de ropa, esto ocasionará que complementos como actuadores sean mas pequeños, ya que, no necesitarían torques grandes o bancos de alimentación excesivos.

En el boxeo se usan diversos estilos de golpes, entre ellos existen tres golpes mas utilizados por los boxeadores:

- Golpe en Uppercut
- Golpe en Right Hook
- Golpe en Jab

Estos estilos de golpeo son utilizados en su totalidad por profesionales, siendo estos ideales para comenzar las pruebas del sistema, hay que considerar que se ocupa la totalidad de los movimientos provenientes del hombro, codo y espalda y no debería de presentar problema alguno.

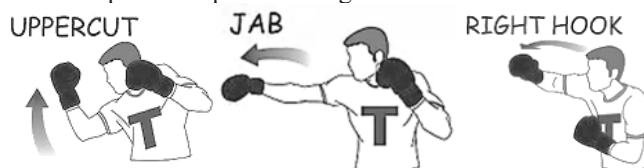


Figura 2. Principales movimientos del boxeo.

El diseño fue generado y reestructurado bajo las características del miembro superior,

ESPALDA

En la espalda se coloca un grado de libertad perteneciente al eje anteroposterior (véase tabla 1) teniendo un recorrido horario y antihorario de 20°. Esta encargada de cargar el peso total de la estructura del dispositivo y del brazo, redireccionando las fuerzas hacia la espalda del usuario. Se realizó una estructura rígida para el asentamiento en la parte dorsal del operario. Esta estructura será sujeta mediante cintas ancladas a sus pestañas de sujeción. El grado de libertad asistirá al movimiento de abducción y aducción en el eje anteroposterior. Por lo tanto, la pieza contará con uno de los actuadores con mayor torque de los cinco que serán utilizados posteriormente.

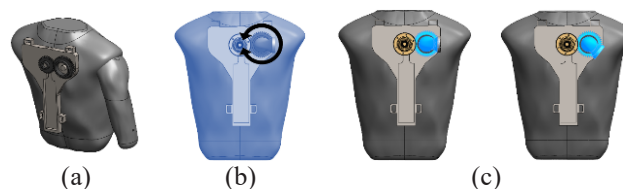


Figura 3. (a) Componente dorsal, (b) Movimiento de 20° en el eje anteroposterior, (c) Posición inicial (0°) y final (20°).

HOMBRO

El hombro es la articulación proximal ubicado en el miembro superior del torso del cuerpo. Es la articulación con más movimientos de todas las articulaciones del cuerpo humano, ubicado en el eje (Véase Fig. 4 (a)) transversal (1),

anteroposterior (2) y vertical (3). El eje anteroposterior se colocó en la espalda para movimientos de 20° , lo que ayuda a aligerar la carga del hombro colocando únicamente dos movimientos sobre él.

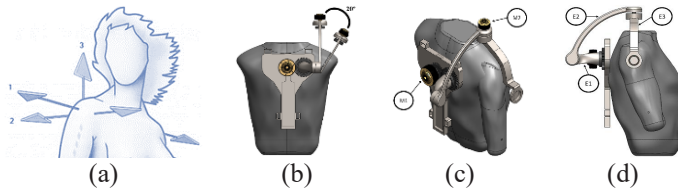


Figura 4. (a) Ejes del hombro, (b) GDL en 20° para el movimiento anteroposterior del hombro, (c) Motores aplicados a los ejes anteroposterior y vertical, (d) número de eslabones que componen los movimientos de flexión/extensión y abducción y aducción.

En los exoesqueletos portátiles la sujeción de la estructura viene desde el sujetador de espalda, mochila, faja o la técnica más eficiente para el sistema. El eslabón E1, se plantea en una unión de salida en lugar de entrada, esto quiere decir que, el sujetador abrazara el cien por ciento del cuerpo del operador y se generara un movimiento más suave y menos estorboso para el eslabón E2. El anclaje del eslabón E2 permite colocar y retirar la estructura del usuario de una forma más cómoda.

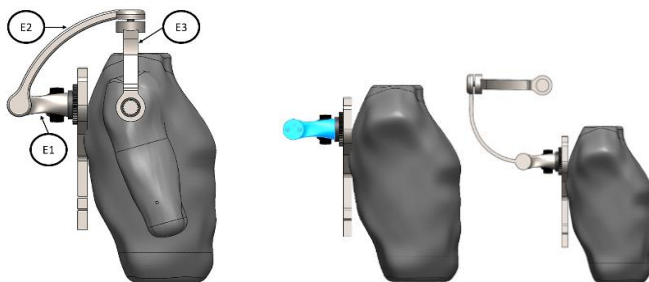


Figura 5. Análisis de funcionamiento y sujeción de E1 a E2.

Tomando en consideración que la distancia A es la que determina a la distancia C en el eslabón E2, se coloca el eslabón E3 (véase fig. 4 (d)) para realizar el movimiento de flexión/ extensión horizontal.

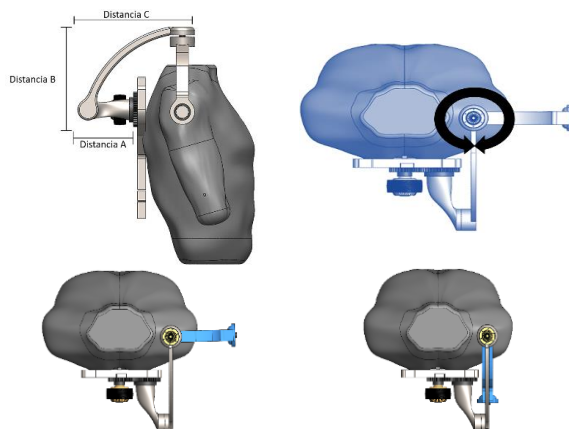


Figura 6. Movimiento flexo/extensión horizontal con un recorrido de 140° sobre el eje vertical del motor M2

El eslabón E3 y el eslabón E4 forman un tercer grado de libertad perteneciente a los tres esenciales del hombro, este provoca el movimiento de extensión y flexión (véase tabla 1) del hombro provocando un movimiento angular vertical, este culmina con los tres GDL empleados para el hombro dentro del sistema robótico.

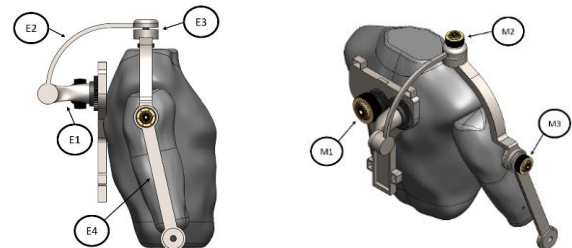


Figura 7. 3 GDL (M1, M2, M3) conectados a los ejes transversal, anteroposterior y vertical para los movimientos de los eslabones E1, E2, E3 y E4 del hombro.

El eje transversal está situado en el motor M3 (véase fig. 7) es el eslabón E4 conectado al eslabón E3 generando movimientos de flexo/extensión con un rango de flexión de 180° y extensión de 45 a 50 grados. Realizando palanca del peso total del brazo y la puntal de lo que sujetará la mano u accesorios a lo largo del miembro superior.

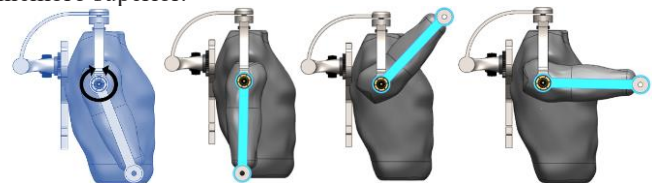


Figura 8. Movimiento flexo/extensión en el eje transversal sobre el motor M3 creando un 3er GDL para el hombro.

Con esto se concluyen los tres GDL que utilizaría el sistema robótico a la altura del hombro contando con cuatro eslabones, un sistema de transmisión general y un componente dorsal.

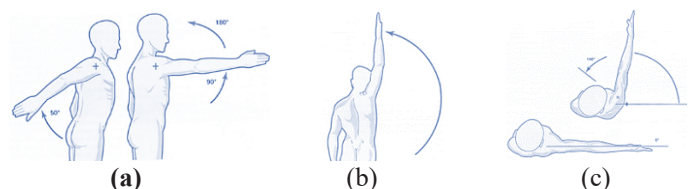


Figura 9. (a) Movimiento en el eje trasversal (F/E) ($180^\circ/50^\circ$), (b) Movimiento en el eje anteroposterior (A_a/A_a) ($90^\circ/180^\circ$), (c) Movimiento en el eje vertical (F/E horizontal) ($140^\circ/30^\circ$)

CODO

El codo es el encargado de realizar la palanca al sujetar un objeto con la mano. Brinda posición con el movimiento de la pronosupinación en conjunto con el antebrazo. El codo tiene un único eje, es en paralelo con el eje transversal del hombro y provoca movimientos de Flexión con un rango de 140 a 145 grados de movimiento, dentro del exoesqueleto robótico se conecta en el eje un motor M4 y junto a él dos eslabones E4 y E5 considerado el cuarto grado de libertad del dispositivo.

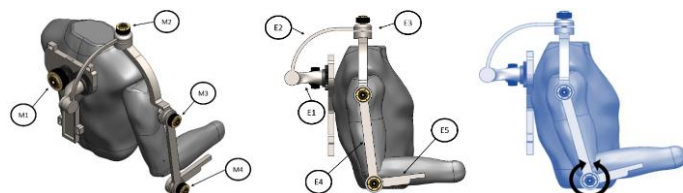


Figura 10. Eslabón E5 movimiento aproximado del codo con un motor M4, considerado el 4º GDL.

El movimiento generado por el codo esta asistido por el eslabón E4 para su movimiento angular esto genera movimientos indirectos sobre él, se observa el movimiento natural del eslabón E5 (véase fig. 11) haciendo un barrido sobre su propio eje, el movimiento del eslabón E5 (véase fig. 12) guiado por el eslabón E4, guardando los mismos ángulos de giro del E5, pero con diferentes trayectorias.

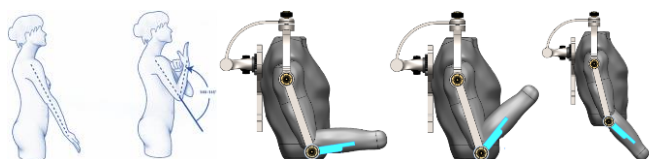


Figura 11. Movimiento en el eje transversal (F) (140 a 145º) y Trayectoria natural del eslabón E5.

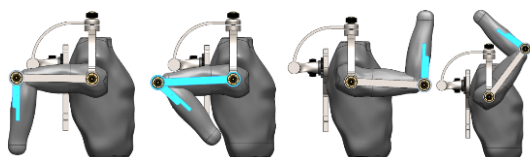


Figura 12. Trayectoria del eslabón E5 con guía de E4.

Con esto se concluye el estudio del cuarto grado de libertad del dispositivo robótico colocado en la articulación del codo. Anatómicamente el codo solo contiene un solo movimiento ya que cuenta con una cavidad articular, sin embargo, su fisonomía permite dos funciones distintas: su movimiento natural que es la flexo/extensión y una adicional con ayuda de una segunda articulación que es la pronosupinación.

ANTEBRAZO

El antebrazo tiene un movimiento característico dentro del miembro superior, llamado Pronosupinación este movimiento está a lo largo del eje longitudinal (véase tabla 1) conectado a dos articulaciones: La articulación radio-cubital superior y la articulación radio-cubital inferior. El mecanismo propuesto para asistir el movimiento de la pronosupinación es un doble balancín, este estará anclado al eslabón E5 (véase fig. 13). El mecanismo cuenta con un tal de 6 conjuntos de eslabones para la pronosupinación (CEP) e incluido un actuador M5 siendo este el 5º grado de libertad de los cinco propuestos.



Figura 14. Mecanismo propuesto para el movimiento de la pronosupinación en el antebrazo.

El CEP cuenta con un total de 6 piezas (véase fig.15) que lo conforman entre ellas cuatro dedicadas al movimiento de la posición supinación y la posición pronación. Este mecanismo permite tener un barrido de 175º efectivos lo que permite a la mano tener la movilidad necesaria para tomar los ángulos que se manejan dentro de las prácticas de boxeo.

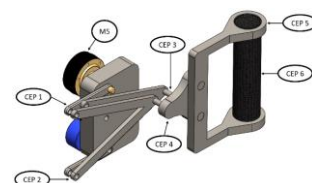


Figura 15. Conjuntos de eslabones para el mecanismo de movilidad de la pronosupinación.

La pronosupinación se basa en el movimiento horario o antihorario del antebrazo generando ángulos libres antes de una lesión leve o severa, estos parámetros se analizan con respecto a la vertical. Se muestra el movimiento natural (véase fig. 16) de la pronosupinación junto con el CEP que genera sus movimientos y previene con topes mecánicos el límite de ángulo permitido para un movimiento sin lesión

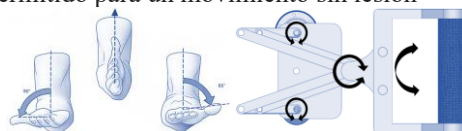


Figura 16. Ángulos que maneja el movimiento de la pronosupinación dentro del rango de movimiento: Sentido horario 85º, sentido antihorario 90º.

Las barras 1 y 2 están conectadas mecánicamente al motor y al sensor respectivamente, estas barras están ancladas a la barra 3 y 4 para su desfase, logrando que la barra 5 tenga un movimiento angular y a su vez un desplazamiento generando una trayectoria diferente a la de su eje natural (véase fig. 17). En la barra 6 y 7 por consecuencia son guiadas por la barra 5 ocasionándoles un giro central.

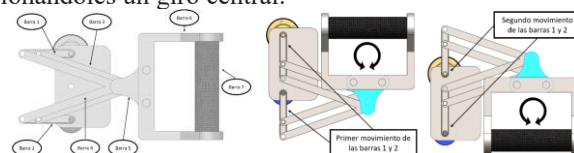


Figura 17. Fundamento del funcionamiento del mecanismo de la pronosupinación.

Con el estudio de los movimientos de las articulaciones antes mencionadas y su adaptación biomecánica, se tienen las bases necesarias para pasar a un modelo virtual real y posteriormente a un prototipo físico para la verificación de la ergonomía del usuario, asimismo, los movimientos reales del mismo tomando en cuenta las limitantes que este presente. Siendo una propuesta de un nuevo enfoque de los exoesqueletos artificiales fuera de las aplicaciones ya estudios y aplicadas como en la medicina o aplicaciones militares se debe de corroborar con un prototipo físico antes de implementar motores y componentes eléctricos y

electrónicos, por ello se realiza una adaptación en CAD sin actuadores y complementos únicamente la colocación de los eslabones y sus uniones.

4. MODELO VIRTUAL

Con la ayuda de los análisis de movimientos del miembro superior se creó un diseño virtual del exoesqueleto robótico, con base en los resultados obtenidos en análisis de movimientos y creación de piezas virtuales se reacondicionó el diseño virtual y se adaptó para que una persona se lo pudiera poner con la ayuda de correas y vendajes. Los eslabones fueron diseñados bajo las normas de medición estándar del miembro superior e implementado a lo largo de la espalda, con este modelo virtual se logrará manufacturar en una impresora 3D por su rapidez y bajo costo de material, esto servirá para analizar los fallos y aciertos del modelo virtual y poder hacer las adecuaciones como selección de material bajo los análisis de esfuerzos; el peso total del dispositivo para añadir actuadores y sistemas de control que ayuden a gestionar las trayectorias que se desean en el sistema.

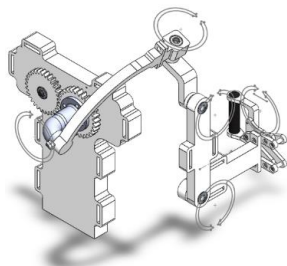


Figura 18. Modelo virtual

El modelo virtual contara con 16 piezas distintas (véase tabla 2), F01x2, F02x2, F03x2 y F04x6 con un total de 28 piezas que conforman la totalidad del modelo virtual sin incluir tornillería. Estas piezas fueron generadas bajo las normas ISO de sistemas mecánicos para los engranajes guía y guiado, y para el sistema de barrenados para la tornillería (milimétrica) que será utilizada cuando el modelo virtual pase a un prototipo físico y sea aplicado al miembro superior de un usuario de prueba.

Tabla 2. Lista de figuras

LISTA DE FIGURAS			
F01 - Espalda	F02 - Espalda	F03 - Espalda	F04 - Espalda
F01 - Hombro	F02 - Hombro	F03 - Hombro	F04 - Hombro
F01 - Codo	F01- Pronosupinación	F02- Pronosupinación	F03- Pronosupinación
F04- Pronosupinación	F05- Pronosupinación	F06- Pronosupinación	F07- Pronosupinación

Tabla 3. Vitas del prototipo físico

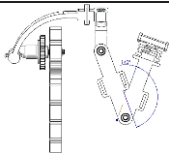
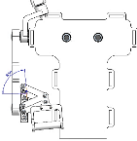
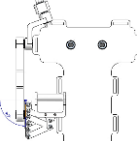
Prototipo Físico		
Material: PLA, Fabricado en una Impresora 3D		
Frontal	Trasero	Superior
Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Inferior

MOVIMIENTOS DEL DISPOSITIVO ROBÓTICO

Dentro del ambiente de dibujo CAD se genero el ensamble total de las piezas para recrear los rangos de movimientos de los estudios biomecánicos de las articulaciones antes mencionadas, corroborando colisiones o malformaciones de movimientos. A continuación, se describe el movimiento y su reacción del modelo virtual utilizando los ángulos obtenidos.

Tabla 4. Tabla comparativa del movimiento del miembro superior y replicado por el sistema robótico propuesto.

MOVIMIENTOS DEL SISTEMA ROBÓTICO	
Descripción	Movimiento
Extensión (Hombro) Movimiento de 45 a 50 grados	
Flexión (Hombro) Movimiento de 0 a 180 grados próxima a la rotación longitudinal	
Aducción (Hombro) Movimientos de 0 a 60 grados que puede efectuarse únicamente en la articulación glenohumeral	
Abducción (Hombro) Movimiento de 60 a 180 grados movimiento en conjunto con la articulación escapulotorácica, la articulación glenohumeral y la articulación escapulotorácica	
Flexión horizontal (Hombro) Movimiento de 140 grados	

La flexión y Extensión (Codo) Movimiento de 145 grados	
Pronación (Antebrazo) Movimiento de 85 grados Ubicado en el plano horizontal	
Supinación (Antebrazo) Movimiento de 90 grados Ubicado en el plano horizontal	

5. CONCLUSIÓN

En el boxeo existe una cantidad considerable de estudios y métodos para la obtención de datos de los deportistas. Utilizando la biomecánica se estudia el comportamiento su movimiento, para entender las características principales de la fisiología de un ser vivo en este caso un boxeador como sus posturas, velocidades de movimiento y la energía que transmite al realizar un golpe. Algunos de los golpes como el uppercut, el right hook y el jab son realizados por el movimiento del hombro, codo y antebrazo en conjunto, por esta razón el comportamiento de estas tres articulaciones es fundamental para general el diseño de una estructura mecánica que sea ergonómica al contacto con el miembro. En la propuesta de diseño del exoesqueleto mecánico se adapta a las características del hombro y sus tres movimientos, al codo y su movimiento al igual que del antebrazo con su movimiento de pronosupinación. Entonces se puede concluir que los movimientos de un boxeador se pueden replicar sin dificultad alguna en un exoesqueleto mecánico, esto se presentó en el modelo virtual ya que, no se presentaba colisiones entre eslabones y se respetan los ángulos de movimiento de cada grado de libertad del miembro superior colocando topes mecánicos para evitar algún tipo de lesión o fractura, esto es de utilidad para pasar al prototipo físico y colocárselo a una persona.

Se recomienda que el modelo virtual sea manufacturado en una impresora 3D por la rapidez para generar las piezas, además, del bajo costo de los materiales de impresión, asimismo, se recomienda seleccionar materiales de impresión bajo los análisis de esfuerzos correspondientes y cálculos de torques para seleccionar los actuadores ideales conforme al peso total y parcial del dispositivo mecánico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Almarza, O. (2021, November 15). Crean un exoesqueleto para mejorar la resistencia a la hora de practicar deporte. Urban Tecno. <https://www.mundodeportivo.com/urbantecno/tecnologia/c>

rean-un-exoesqueleto-para-mejorar-la-resistencia-a-la-hora-de-practicar-deporte

- [2] I. (2019, December 23). El exoesqueleto que reduce las lesiones de rodilla en los esquiadores. Innovaspain. <https://www.innovaspain.com/exoesqueleto-esqui-levier-exo-xnowers/>
- [3] Morales, I. (2020). La Data del boxeo. La Data <http://www.ladata.mx/s04c01/index.html>
- [4] Wang, D., Gu, X., Li, W., Jin, Y., Yang, M., & Yu, H. (2022). Evaluation of safety-related performance of wearable lower limb exoskeleton robot (WLLER): A systematic review. Robotics and Autonomous Systems, 160, 104308. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104308>
- [5] Cifuentes, J., Pham, M. T., Moreau, R., Boulanger, P., & Prieto, F. (2019). Medical gesture recognition using dynamic arc length warping. Biomedical Signal Processing and Control, 52, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.04.022>
- [6] Hoshyarmansh, H., Zareinia, K., Lama, S., & Sutherland, G. R. (2021). Structural design of a microsurgery-specific haptic device: neuroArmPLUS prototype. Mechatronics, 73, 102481. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102481>
- [7] Benabid, A., Costecalde, T., Elisseyev, A., Charvet, G., Verney, A., Karakas, S., Foerster, M., Lambert, A., Morinière, B., Abroug, N., Schaeffer, M., Moly, A., Sauter-Starace, F., Ratel, D., Moro, C., Torres, N., Langar, L., Oddoux, M., Polosan, M., . . . Chabardes, S. (2019). An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration. Lancet Neurology, 18(12), 1112–1122. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(19\)30321-7](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(19)30321-7)
- [8] Carignan, C. R., Liszka, M., & Roderick, S. (2005). Design of an arm exoskeleton with scapula motion for shoulder rehabilitation. International Conference on Advanced Robotics. <https://doi.org/10.1109/icar.2005.1507459>
- [9] Gupta, A., & O'Malley, M. K. (2006). Design of a haptic arm exoskeleton for training and rehabilitation. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 11(3), 280–289. <https://doi.org/10.1109/tmech.2006.875558>

Desarrollo de un exoesqueleto inferior pasivo

Andrés Alemán González * Eladio Martínez Rayón **

Claudia Cortés García *** Andrés Blanco Ortega**** Dariusz Szwedowicz***** Yvonne Chávez Chena *****

*Instituto Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490

(Tel: 777-630-6021; e-mail: m21ce045@cenidet.tecnm.mx).

** (e-mail: eladio.mr@cenidet.edu.mx)

*** (claudia.og@cenidet.tecnm.mx) **** (andres.bo@cenidet.tecnm.mx) ***** (dariusz.sd@cenidet.tecnm.mx)

***** (ycchena@cenidet.edu.mx)

Resumen: En este artículo se presenta el diseño de una estructura tipo exoesqueleto para miembros inferiores pasivo. Se analizó las deformaciones de la estructura con elemento finito para observar las deformaciones al aplicar cargas en diferentes secciones (soporte lumbar, rodilla y tobillo - pie). En seguida se calculó en centro de gravedad del cuerpo humano promedio con medidas antropométricas para obtener las dimensiones de la estructura, así como también sus articulaciones y bases. Posteriormente se presenta el cálculo de posición del centro de rotación instantáneo de un mecanismo de 4 barras cruzado, el cual es aplicado como una articulación tibio - femoral (rodilla) para una estructura tipo exoesqueleto pasivo. Se muestra el procedimiento matemático para obtener las ecuaciones en sus formas vectoriales, posteriormente se halla la solución utilizando el método numérico Newton - Raphson. Este mecanismo es aplicado en una estructura tipo exoesqueleto para miembros inferiores utilizando elementos pasivos, con el objetivo de apoyar en el equilibrio de un paciente manteniéndolo en estado de bipedestación (de pie). Seguidamente se muestra la construcción del prototipo completo.

Palabras clave: Exoesqueleto, ortesis, cadera, fémur, tobillo, geométrico.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, (OMS) el 15% de la población mundial sufre de algún tipo de discapacidad física. Existen numerosos casos de enfermedades neuronales causados por: nacimiento, envejecimiento y/o accidentes, que dejan inmóvil las extremidades de las personas por lo que requieren de una rehabilitación para restaurar sus movimientos motrices. Los impedimentos, consisten en las deficiencias para mantener la bipedestación, particularmente cuando es necesario realizar actividades durante la jornada. Los exoesqueletos comerciales son una solución, pero el costo y mantenimiento elevado los hacen inaccesibles para la mayoría de la población. En México, el número de personas discapacitadas es del 63% de la población económicamente activa y con empleos ganan máximo tres salarios mínimos. (Mayer Granados et al., 2018)

El avance tecnológico ha logrado resolver problemas con respecto al bienestar del cuerpo humano. Actualmente los mecanismos toman un papel importante en la medicina debido a que se han logrado adaptarlo al cuerpo humano, de tal manera que asisten los movimientos de las extremidades superiores e inferiores del paciente. Estos mecanismos están al exterior y adheridos al cuerpo humano sosteniendo la extremidad para asistir o aumentar su capacidad, dichos mecanismo son llamados exoesqueletos.

Se han desarrollado diversos exoesqueletos pasivos como, Zhao et al., (2019) desarrolló un sistema de control del exoesqueleto médico de miembros inferiores controlado por el cerebro. En este proyecto se realizó un sistema de control electrónico para un exoesqueleto de partes inferiores capaz de ser controlado por el cerebro, con el fin de rehabilitar las articulaciones inferiores del cuerpo.

Tovar-Estrada et al., (2019) creo una plataforma de laboratorio a escala de un exoesqueleto totalmente accionado para probar el control de seguimiento de las principales articulaciones de las extremidades inferiores.

Wei et al., (2020) implementó un control basado en sinergia de exoesqueletos auxiliares de extremidades inferiores mediante transferencia de habilidades.

Gao (2022), diseñó una ortesis activa – pasivo con 12 grados de libertad para la rehabilitación de las extremidades inferiores accionado eléctricamente. Este dispositivo apoya al usuario a realizar los ejercicios de rehabilitación con comodidad.

Hwang et al., (2022) presenta un prototipo de robot de rehabilitación de la marcha sobre el suelo para usar asistencia de movimiento y entrenamiento para pacientes paralizados. El diseño de la estructura tiene como objetivo soportar la zona pélvica del

paciente con peso máximo de hasta 100 kg, además de trasladarse de un lugar a otro con una velocidad de 1.6 m/s

Se ha observado que la mayoría de los proyectos con respecto a los exoesqueletos están enfocados principalmente en la rehabilitación motriz de los miembros del cuerpo en pacientes o bien están enfocados en el aumento de rendimiento del cuerpo humano. Por otra parte, la mayoría de las estructuras de exoesqueletos se fabrican con aluminio o aleaciones de metales, los cuales aportan rigidez a la estructura. Sin embargo, eleva el costo del producto por lo que la mayoría de las personas con bajos recursos que necesitan de una rehabilitación no tienen un fácil acceso a estos tratamientos. Otra característica es la energía que se utiliza para accionar el mecanismo, lo que causa que se sume más peso a la estructura y se apliquen sistemas de control y actuadores que consuman bastante energía para el correcto funcionamiento.

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir una estructura de tipo exoesqueleto para miembros inferiores rígido con articulaciones pasivas, no empotrada, de bajo costo, confiable, ligero y ergonómico de tal manera que asista al equilibrio estático (bipedestador) de una persona que padezca alguna dificultad motriz o deformación por nacimiento y/o accidente en la cadera, rodilla o tobillo.

2. Exoesqueleto para miembros inferiores

2.1 Distribución de peso en el cuerpo humano

Herman, I. P. (2010). Menciona que cuando una persona media se encuentra en bipedestación con los dos miembros inferiores, la carga en las articulaciones de las caderas se distribuye de tal manera que cada una soporta solo un tercio del peso total del cuerpo.

El fémur es el hueso más largo y fuerte del cuerpo humano que se compone por las extremidades superior e inferior, que es ampliamente abultada, hecho que provee una buena superficie de soporte para transmisión del peso hacia el extremo superior de la tibia (Maria Claudia Panesso, Maria constanza Trillos, 2008).

La tibia se articula con el fémur y soporta el peso del cuerpo y lo transmite del fémur al pie Se encuentra orientada verticalmente y es más fuerte que el peroné que la acompaña. Permite la transmisión del peso del cuerpo como las fuerzas de reacción del suelo (Maria Claudia Panesso, Maria constanza Trillos, 2008).

Con la información anatómica del cuerpo humano promedio se tomaron en cuenta las características del exoesqueleto de miembros inferiores que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características del exoesqueleto para miembros inferiores.

Exoesqueleto	
Altura	1.22 m
Ancho	0.5 m

Tipo	Estático (Pasivo)
Soporte de carga Max	100 Kg.
Ajustable	No

2.2 Desarrollo del exoesqueleto para miembros inferiores

El diseño tiene como principal objetivo ser pasivo. Se compone de tres partes, cadera, fémur y peroné-tobillo. La ortesis tiene una altura máxima de 122cm, para una persona con altura no mayor a 170 cm. Para la construcción de dicho exoesqueleto, se tomó en cuenta la siguiente lista (Tabla 2) de materiales.

Tabla 2. Lista de materiales.

Material	
1	Tereftalato de polietileno glicol (PETG)
2	Acero A36
3	Poli cloruró de vinilo clorado (CPVC)

2.3 Análisis estructural

EL diseño de la estructura Fig. 1. Es sometida a simulación considerando el tipo de material para cada parte del exoesqueleto de igual forma, se tomaron en cuenta las condiciones de fuerza que fueron aplicadas en dos direcciones. El porcentaje de fuerza total se divide en dos partes, del torso 33.3% y de la cadera tiene 66.6% (Herman,2010).

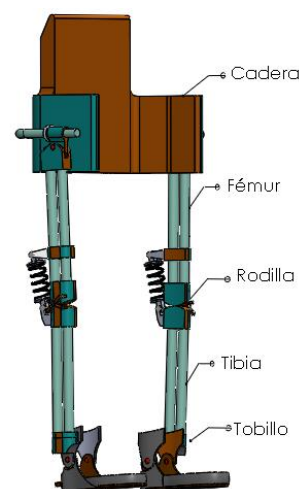


Fig. 1. Exoesqueleto pasivo.

Con la simulación en el análisis de elemento finito se observa las deformaciones que puede llegar a tener la estructura, así como también se puede determinar la confiabilidad de la estructura para el uso del paciente. En la Tabla 3 se muestra las condiciones que se tomaron en cuenta para dicho análisis como: como los puntos de empotramiento (tornillos, pernos, bases, etc.) y las fuerzas aplicadas para una carga máxima de 100 Kg dividida en 3 secciones: soporte lumbar(F1), extremidad inferior izquierdo (F2) y derecho (F3).

Tabla 3. Condiciones iniciales

Empotramiento de la parte inferior

Fuerza 1 con valor de 415 N
Fuerza 2 con valor de 392.266 N
Fuerza 3 con valor de 392.266 N

En la Fig. 2, se observa la aplicación de las condiciones iniciales y la deformación. La ortesis dispone un límite elástico de 3.458×10^7 N/m² y una deformación de 0.5687 mm.

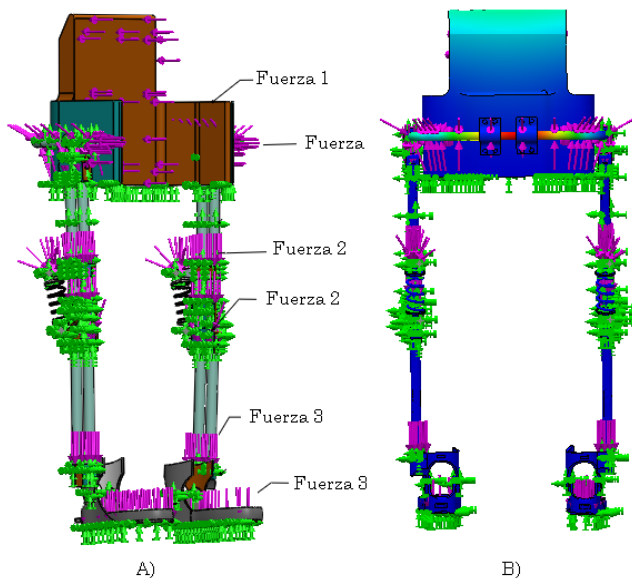


Fig. 2. A) Condiciones iniciales, B) deformación del exoesqueleto.

En la Fig. 3, se observa el factor de seguridad que presenta el exoesqueleto con las condiciones aplicada y el material, teniendo un resultado un factor de seguridad de 5, por tanto, de acuerdo con el criterio de máxima tensión de Von Mises la estructura es confiable para el usuario.

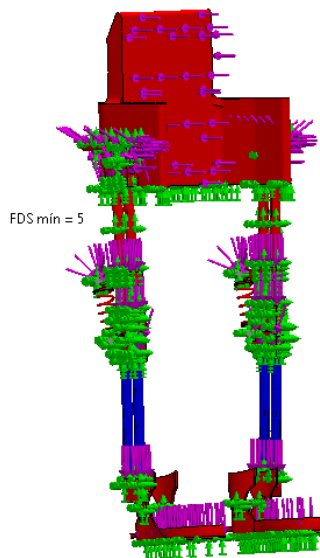


Fig. 3. Factor de seguridad.

2.4 Modelado matemático

2.4.1 Centro de gravedad

Para la construcción del prototipo se tomó en cuenta el peso del cuerpo humano y estatura promedio, así como el centro de gravedad.

$$X_{c.g} = \frac{\sum(A_i * x_i)}{\sum A_i} \quad (1)$$

$$Y_{c.g} = \frac{\sum(A_i * y_i)}{\sum A_i} \quad (2)$$

Para encontrar el centro de gravedad del cuerpo humano se toman medidas de sus extremidades y se colocan en un plano dividiendo en figuras geométricas regulares de tal manera que con las Ecuaciones 1 y 2, se calcule centro de gravedad de una figura compuesta por geometría tales como: triángulo, rectángulo y círculo. En la Fig. 4. se presenta las secciones geométricas que ayudaron a conocer el centro de gravedad del cuerpo en el plano frontal y sagital.

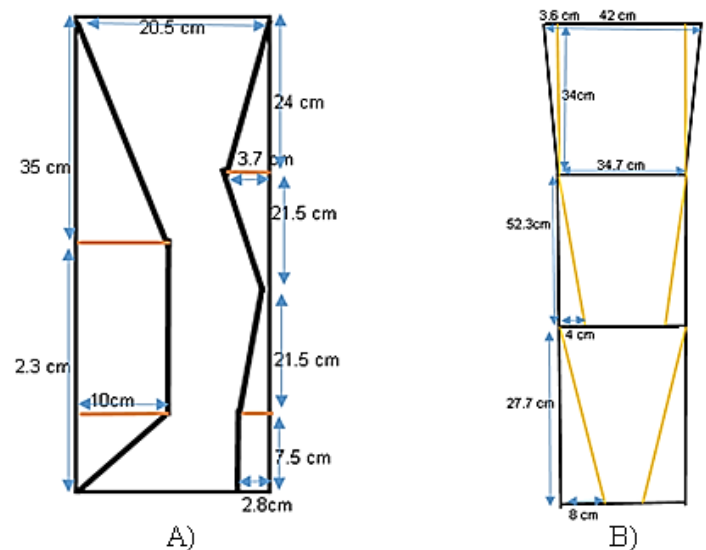


Fig. 4. Seccionamiento geométrico de la pierna en plano sagital y frontal.

Tomando en cuenta las figuras geométricas mostradas anteriormente, se colocan en un plano cartesiano para hallar las coordenadas en (x, y) de los centroides de cada figura, así como también calcular el área correspondiente (Tabla 4).

Se observa el área en cm² de cada geometría, en caso de los negativos son las áreas que se restan. En (x, y) representan las

coordenadas de los centroides, la columna de Ax y Ay encontramos el producto de la coordenada y del área.

Tabla 4. Datos geométricos de la pierna en plano sagital.

	Áreas	x	y	AX	AY
	-175	5	61.16	-875	-10703
	-420	5	28.5	-2100	-11970
	-37	3.33	2.5	-123.21	-92.5
	-44.4	16.2	72	-719.28	-3196.8
	-79.55	16.23	36.16	-1291.0965	-2876.528
	-30.1	0.93	14.66	-27.993	-441.266
	-10.5	16.4	3.75	-172.2	-39.375
	1640	10.25	40	16810	65600
Torso	697	10.25	97	7144.25	67609
Σ sumatoria	1540.45			18645.4705	103889.531

Posteriormente se sustituyen los valores de sumatoria en (1) y (2), obteniendo el centro de masa del paciente con respecto al origen del plano cartesiano:

$x_{C.M} = 12.1 \text{ cm}$ $Y_{C.M} = 67.44 \text{ cm}$ en el plano sagital.

Para conocer el centro de masa en el plano frontal del paciente se realiza el mismo procedimiento, logrando conocer centro de masa con respecto al origen del plano cartesiano:

$x_{C.M} = 18.7 \text{ cm}$ $Y_{C.M} = 62.1 \text{ cm}$ en el plano frontal.

2.4.2 Articulación Tibio-Femoral

El mecanismo seleccionado para la representación de la rodilla se queda a cargo de un mecanismo de 4 barras cruzado, este mecanismo se implementó a las funciones de aducción y abducción del fémur y la tibia.

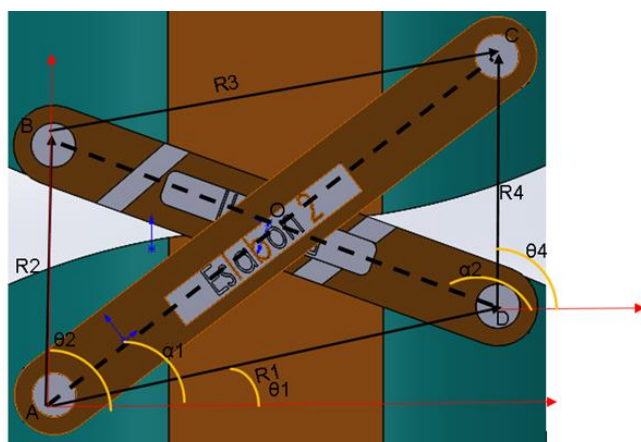


Fig. 5. Mecanismo de cuatro barras.

El diagrama de cuerpo libre (Fig. 5) consta de cuatro eslabones que son representados por R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , formando un paralelogramo. Los eslabones R_2 y R_4 son variables, debido que

la rodilla podrá tener una pequeña flexión, y los eslabones cruzado son representado por las constantes $\overline{AC}$ y $\overline{BD}$.

Para el cálculo de la distancia R_4 , β_1 y θ_4 , se utilizó el diagrama de cuerpo libre de la Fig. 6.

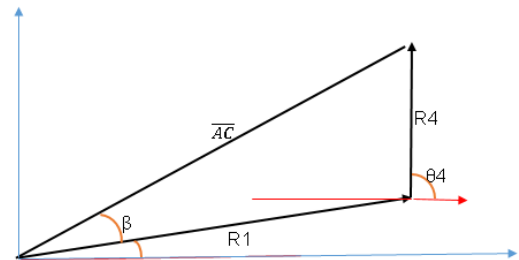


Fig. 6. Diagrama de cuerpo libre.

$$R4 = \sqrt{R1^2 + \overline{AC}^2 - 2R1\overline{AC}\cos(\beta)} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \cos^{-1} \frac{R1^2 + R4^2 - R2^2}{2R1R4} \quad (4)$$

$$\theta_4 = 180 - \beta_1 + \theta_1 \quad (5)$$

Conociendo los valores anteriores, se procede a calcular el centro de rotación instantáneo del mecanismo. Para ello, se arman dos lazos que permitan crear el número de ecuaciones para dar solución al sistema.

Lazo 1.

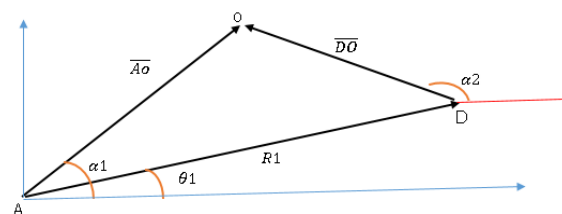


Fig. 7. Lazo 1 del mecanismo de cuatro barras cruzado.

Ecuaciones encontradas.

$$F_1(Xn) = \overline{A0} \cos \alpha_1 - R1 \cos \theta_1 - \overline{D0} \cos \alpha_2 = 0 \quad (6)$$

$$F_2(Xn) = \overline{A0} \sin \alpha_1 - R1 \sin \theta_1 - \overline{D0} \sin \alpha_2 = 0 \quad (7)$$

Lazo 2.

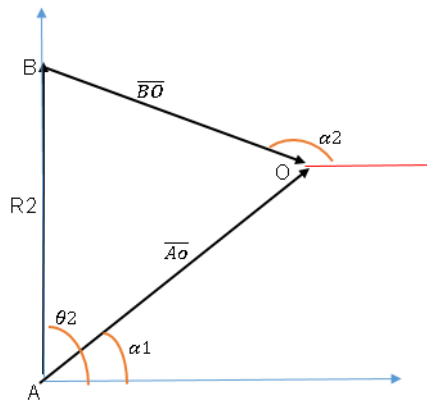


Fig. 8. Lazo 2 del mecanismo de cuatro barras cruzadas.

Se hallaron las siguientes ecuaciones:

$$f_3(X_n) = R_2 \cos \theta_2 + \overline{BO} \cos \alpha_2 - \overline{AO} \cos \alpha_1 = 0 \quad (8)$$

$$f_4(X_n) = R_2 \sin \theta_2 + \overline{BO} \sin \alpha_2 - \overline{AO} \sin \alpha_1 = 0 \quad (9)$$

Conociendo las ecuaciones de los lazos (1 y 2), se definen las variables conocidas y las incógnitas, por lo que R_1 , θ_2 , α_1 , $\overline{BD}$ son variables conocidas, mientras R_2 , α_2 , $\overline{AO}$, $\overline{DO}$ como incógnitas.

Para la solución del sistema se basará en el método de Newton-Raphson. por lo tanto, en la Ecuación 10, ayudó a dar solución al sistema de incógnitas mencionadas anteriormente.

$$[J(\overline{X}_n)] * [\Delta X] = -f(\overline{X}_n) \quad (10)$$

La propuesta de los valores iniciales y constantes se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores iniciales y propuestos.

Variable	Valor propuesto	Inicial
R_1	-----	51
R_2	28	-----
BD	-----	53.29
AO	30	-----
DO	25	-----
θ_1	-----	11.31
θ_2	-----	90
α_1	-----	26.09
α_2	150	-----

Primera iteración con el método numérico de Newton-Raphson, al sustituir los valores de la Tabla 5, se muestran los siguientes valores.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.8981 & 0.9396 & 9.1131 \\ 0 & 0.4397 & -0.3420 & 25.0381 \\ 0 & -0.8981 & 0.9396 & -9.1131 \\ 1 & 0.4397 & -0.3420 & -25.0381 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_3 \\ \Delta X_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2432 \\ -5.3016 \\ -53.2430 \\ 23.3017 \end{pmatrix}$$

Después de tres iteraciones se obtuvieron los siguientes valores (Tabla 6).

Tabla 6. Valores obtenidos con el método Newton-Raphson.

Variable	Valor propuesto	Inicial
R_1	-----	51
R_2	28.3413	-----
BD	-----	53.29
AO	31.405	-----
DO	26.645	-----
θ_1	-----	11.31
θ_2	-----	90
α_1	-----	26.09
α_2	159.9358	-----

Al obtener la distancia $\overline{AO}$ y el ángulo α_1 , se puede calcular la posición (x, y) del centro rotacional (O) en el plano cartesiano.

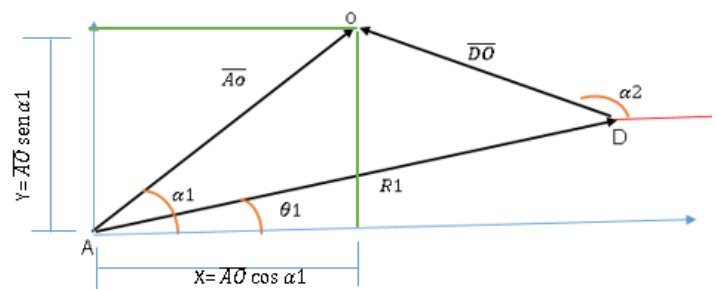


Fig. 9. Diagrama de cuerpo libre – centro de rotación instantáneo.

Es importante mencionar que el proceso debe repetirse cada vez que θ_2 y α_1 cambien. Lo que es recomendable el desarrollo de un algoritmo en el software Matlab.

3. CONSTRUCCIÓN

Al igual que la simulación se utilizaron los mismos materiales de la Tabla 2 en la construcción del prototipo, como se muestra en la Fig. 10



Fig. 10. Prototipo exoesqueleto para miembros inferiores

Al finalizar la construcción de la estructura se realizaron experimentos con el paciente para observar las deformaciones en el soporte lumbar, articulación de cadera y articulación de tobillo – pie, así como también observar el correcto funcionamiento al mantener el equilibrio del paciente para mantenerlo en estado de bipedestación.

4. CONCLUSIONES

El diseño de del mecanismo de 4 barras cruzadas resulto ser eficiente para sostener el peso del paciente, así como también seguir los movimientos de flexión y extensión del fémur y la tibia.

En la construcción del prototipo de exoesqueleto se encontraron algunos retos como consecuencia de los cambios hechos a las piezas para mejorar su ensamblaje, sin embargo, se realizaron pruebas con el paciente. En este diseño la estructura soporta el peso del paciente cuando se inclina hacia adelante, izquierda y derecha, pero cuando el paciente se inclina hacia atrás, la estructura no lo soporta al 100 % por lo que se recomienda mejorar el diseño previo.

REFERENCIAS

Mayer Granados, Colegio de México, J. A., , E. L., Cheín Schekaiban, N. F., Charles Coll, J. A., Mayer Granados, E. L., & Cheín Schekaiban, N. F. (2018). Estudios económicos. In Estudios Económicos (México, D.F.) (Vol. 33, Issue 2). El Colegio de México A.C.

- Esteban Emilio Rosero G. (2001). CIENCIA Y TECNOLOGÍA Ciencia y tecnologías. Concytec, 3, 144–158.
- Moyo Gao, Zhanli Wang, Zaixiang Pang, Jianwei Sun, Jing Li , huang Li, H. Z. (2022). Electrically Driven Lower Limb Exoskeleton Rehabilitation Robot Based on Anthropomorphic Design. Mechatronic and Intelligent Machines.
- Tovar-Estrada, M., Rodriguez-Liñan, A., & Quiroz, G. (2019). Implementation of a Scale-Lab Lower-Limb Exoskeleton with Motion in Three Anatomical Planes. Cybernetics and Systems.
- L. Meriam, J., & L.G., K. (2019). Mecánica para ingenieros estática I. Reverte.
- Maria Claudia Panesso, Maria constanza Trillos, I. T. G. (2008). Biomecánica clínica de la rodilla.
- Herman, I. P. (2010). Physics of the human body. In Choice Reviews Online (Vol. 48, Issue 02).
- Hwang, S., Lee, S., Shin, D., Baek, I., Ham, S., & Kim, W. (2022). Development of a Prototype Overground Pelvic Obliquity Support Robot for Rehabilitation of Hemiplegia Gait. Sensors.
- Wei, Q., Li, Z., Zhao, K., Kang, Y., & Su, C. Y. (2020). Synergy-Based Control of Assistive Lower-Limb Exoskeletons by Skill Transfer. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.
- Zhao, Y., Jia, B., Liu, W., Ge, W., & Dong, R. (2019). The control system research of the brain controlled medical lower limb exoskeleton. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering.

Estudio teórico de las cargas pico en heliostatos debidas a la capa límite atmosférica utilizando la técnica CDRFG para la generación de turbulencia

R.L. Durán, J.F. Hinojosa, M.E. Hinojosa, E. Padilla, V.M. Maytorena, S. Moreno

Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000
(e-mails: a218230072@unison.mx, fernando.hinojosa@unison.mx, a218209800@unison.mx, a218201383@unison.mx, victor.maytorena@unison.mx, a212218098@unison.mx).

Resumen: Se presenta un estudio de dinámica de fluidos computacional sobre la generación de un flujo con propiedades de capa límite atmosférica y su interacción con un heliostato mediante el modelo de *Large Eddy Simulation*. Se utilizó la técnica CDRFG (*Consistent Discretizing and Synthesizing Random Flow Generation*), la cual permite replicar las condiciones experimentales de un túnel de viento (perfil de velocidad, perfil de intensidad turbulenta, tamaño de torbellinos y espectro de turbulencia) mediante modelos de Fourier. Se compararon los perfiles obtenidos y se observó buena homogeneidad horizontal en dirección del flujo, además de una buena concordancia con respecto a datos experimentales. Se realizó un análisis aerodinámico en un heliostato para un ángulo de elevación de 30° en el cual se monitoreó la evolución de los coeficientes de arrastre, sustentación y volcamiento donde se observó una buena predicción de los valores pico.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, capa límite atmosférica, heliostato, aerodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

Los heliostatos son dispositivos mecánicos que constan de mecanismos de seguimiento y superficies reflectoras empleados comúnmente en aplicaciones de concentración solar. Su uso en hornos solares es para reflejar la luz del sol hacia un concentrador el cual redirige la radiación concentrada a un receptor. En sistemas solares de torre central se utiliza un clúster de heliostatos para concentrar la radiación solar directamente al receptor y así calentar un fluido de trabajo. Los heliostatos se encuentran instalados a la intemperie y están sujetos a las condiciones climatológicas de la zona, como la lluvia, el polvo o el viento, siendo esta última una de suma importancia. Debido a su geometría, un heliostato interactúa con las corrientes de aire, lo cual ocasiona esfuerzos en su estructura pudiendo provocar errores de seguimiento o fallas mecánicas.

Actualmente la capacidad instalada de plantas de concentración solar a nivel mundial alcanza los 6,390 MW (IRENA, 2022) y aproximadamente el 30% de costo de construcción de un sistema de torre central se debe al campo de heliostatos (IRENA, 2010). Emes *et al.* 2015 estimaron que el costo nivelado de la electricidad (LCOE) de una STTPP puede reducirse hasta un 18% mediante una correcta selección de velocidad de diseño de los heliostatos.

Los primeros estudios experimentales sobre las cargas aerodinámicas en heliostatos debidas al viento atmosférico (ABL) fueron desarrollados por Peterka *et al.* 1986 - 1989. Estos trabajos se llevaron a cabo en túneles de viento y estaban orientados a conocer las cargas medias y pico en heliostatos aislados, clúster de heliostatos, heliostatos circulares e incluso

técnicas como barreras de viento para la reducción de las fuerzas aerodinámicas.

Otros trabajos experimentales encontrados en la literatura especializada son los desarrollados por Emes *et al.* 2019 donde se estudió la distribución de presiones en la cara de los heliostatos y el momento que estas generaban. Jafari *et al.* 2019 estudió la correlación del tamaño de los torbellinos y la fuerza de sustentación. Más recientemente Emes *et al.* 2022, propuso el uso de aditamentos en los bordes de las facetas de los heliostatos con el fin de reducir las cargas aerodinámicas.

Una alternativa a los estudios en túneles de viento para el análisis del fenómeno aerodinámico en heliostatos es la dinámica de fluidos computacional (CFD). La mayoría de estudios CFD que involucran la capa límite atmosférica están enfocados principalmente al estudio aerodinámico de edificios o dispersión de sustancias tóxicas (Buffa *et al.* 2021, Vasilopoulos *et al.* 2021), sin embargo, las técnicas utilizadas en este tipo de trabajos se pueden implementar en heliostatos.

Marais *et al.* 2015 estudió el efecto de la relación de aspecto en las cargas aerodinámicas medias, mientras que Poulain *et al.* 2016 analizó el efecto de la separación de facetas. Recientemente Durán *et al.* 2022 propusieron el uso de la metodología propuesta por Parente *et al.* 2011 para resolver el problema de la no homogeneidad horizontal del flujo atmosférico y así obtener una buena predicción de los coeficientes aerodinámicos medios reportados por Peterka *et al.* 1986. Sosa *et al.* 2022 estudió el efecto de la parte posterior del heliostato en las cargas

aerodinámicas pico mediante simulación LES y el método de vórtices.

Desde el punto de vista de diseño estructural, es necesario conocer tanto las cargas aerodinámicas medias y pico presentes en los heliostatos. Mediante modelos de turbulencia RANS solo pueden conocerse las cargas medias y para conocer las cargas pico es necesario el uso de modelos LES. Para desarrollar una correcta simulación LES es necesario generar en el dominio computacional las condiciones experimentales de un túnel de viento como: perfil de velocidad medio, perfiles de intensidades turbulentas, perfiles de tamaño de remolinos y espectro turbulento. En la literatura especializada se pueden encontrar dos familias de métodos para la generación de estas condiciones de flujo: métodos precursores y métodos sintéticos. En los métodos precursores se replica un túnel experimental en un dominio computacional (Yoshikawa and Tamura 2012, Asgari *et al.* 2022, McMullan and Angelino 2022), sin embargo, este tipo de estudios son computacionalmente muy demandantes y solo pueden desarrollarse con super cómputo. Los métodos sintéticos generan las condiciones del flujo mediante modelos estadísticos y requieren menos tiempo de cómputo, estos se dividen en técnicas de Fourier, filtrado digital y método de vórtices. En el área de ingeniería del viento el método mayormente utilizado para el análisis de cargas aerodinámicas son los basados en técnicas de Fourier (Lu *et al.* 2012, Guichard 2019, Chen and Zhu 2020).

En el presente estudio se propone el uso de la técnica sintética CDRFG propuesta por Aboshosha *et al.* 2015 para la generación de la capa límite atmosférica y el cálculo de cargas pico en heliostatos.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1 Modelo de turbulencia

Se utilizó el modelo LES (*Large Eddy Simulation*) en este estudio, el cual permite la simulación de torbellinos grandes y modelación de torbellinos pequeños. Las ecuaciones de movimiento y continuidad filtradas para un flujo Newtoniano e incompresible se muestran a continuación:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu \bar{S}_{ij} + T_{ij}) \quad (2)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$T_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j} \quad (4)$$

Donde $\bar{S}_{ij}$ es el tensor de deformación a gran escala, mientras que el efecto de escalas pequeñas aparece mediante el término de esfuerzo de subescala $\overline{T_{ij}}$.

2.2 Generador de turbulencia y perfiles a la entrada

A la entrada del dominio computacional se utilizó la técnica CDRFG desarrollada por Aboshosha *et al.* 2015, la cual genera una distribución de velocidades que replica el espectro de turbulencia (S_u, S_v, S_w), perfil de velocidad media (U), perfiles de intensidad turbulenta (I_u, I_v, I_w) y perfiles de tamaño de remolinos (L_u, L_v, L_w) de una capa límite atmosférica (5).

$$u_i(x_j, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_i^{m,n} \cos(k_j^{m,n} x_j^m + 2\pi f_{n,m} t) + q_i^{m,n} \sin(k_j^{m,n} x_j^m + 2\pi f_{n,m} t) \quad (5)$$

Donde:

$$p_i^{m,n} = \text{sign}(r_i^{m,n}) \sqrt{\frac{1}{N} S_{ui}^m \Delta f \frac{(r_i^{m,n})^2}{1 + (r_i^{m,n})^2}} \quad (6)$$

$$q_i^{m,n} = \text{sign}(r_i^{m,n}) \sqrt{\frac{1}{N} S_{ui}^m \Delta f \frac{1}{1 + (r_i^{m,n})^2}} \quad (7)$$

$$U = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (8)$$

$$I_j = I_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{-d_j} \quad (9)$$

$$L_j = L_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{-\varepsilon_j} \quad (10)$$

$$\text{Coh}(f_m) = \exp \left(-\frac{C_j f_m dx_j}{U} \right) \quad (11)$$

$$S_u = \frac{4(I_u U)^2 \left(\frac{L_u}{U} \right)}{\left(1 + 70.8 \left(\frac{f L_u}{U} \right)^2 \right)^{5/6}} \quad (12)$$

$$S_v = \frac{4(I_v U)^2 \left(\frac{L_v}{U} \right) \left(1 + 188.4 \left(\frac{2f L_v}{U} \right)^2 \right)}{\left(1 + 70.8 \left(\frac{2f L_v}{U} \right)^2 \right)^{11/6}} \quad (13)$$

$$S_w = \frac{4(I_w U)^2 \left(\frac{L_w}{U} \right) \left(1 + 188.4 \left(\frac{2f L_w}{U} \right)^2 \right)}{\left(1 + 70.8 \left(\frac{2f L_w}{U} \right)^2 \right)^{11/6}} \quad (14)$$

En la tabla 1 se listaron las cantidades del modelo con el fin reproducir las condiciones experimentales reportadas por Peterka *et al.* 1986. Sin embargo, en ese estudio solo se reportaron las cantidades en dirección del flujo, Li *et al.* 2015, Ricci *et al.* 2018 propusieron calcular los perfiles en las direcciones faltantes como una fracción de los perfiles en la dirección x, lo cual concuerda con los datos experimentales obtenidos mediante túneles de viento donde se muestra que los flujos de capa límite atmosférica son anisotrópicos. En el presente estudio se consideró $I_v=I_w=0.5I_u$ y $L_v=L_w=0.5L_u$.

Tabla 1. Cantidades del modelo.

Cantidad	Valor	Cantidad	Valor
α	0.1370	Z_{ref}	0.1670 m
nm	150	U_{ref}	11.8108 m s ⁻¹
f_{min}	0.2333 Hz	$I_{u,ref}$	0.1250
f_{max}	70 Hz	$I_{v,w,ref}$	0.0625
Δf	0.4682 Hz	$d_{u,v,w}$	-0.1558
Δt	0.00286 s	$L_{u,ref}$	0.4328 m
nt	1750	$L_{v,w,ref}$	0.2164 m
L_{ref}	0.1082 m	$\epsilon_{u,v,w}$	0

2.3 Cargas aerodinámicas

Se le llama cargas aerodinámicas a las fuerzas y momentos generados en un objeto debido a su interacción con el viento. Los coeficientes se obtienen mediante las ecuaciones (15) y (16).

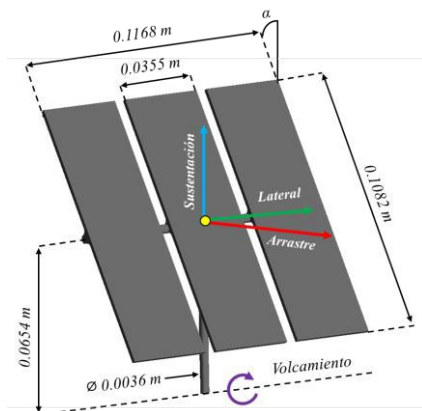


Figura 1. Dimensiones del heliostato y coeficientes aerodinámicos.

$$Drag, Lift = \frac{F_{Drag,Lift}}{\frac{1}{2} \rho A_{ref} u_{ref}^2} \quad (15)$$

$$Overturning = \frac{M_{Overturning}}{\frac{1}{2} \rho A_{ref} L_{ref} u_{ref}^2} \quad (16)$$

3. CASOS DE ESTUDIO

El presente trabajo se dividió en 2 etapas, la primera de ellas comprende es una simulación de una capa límite atmosférica en un dominio vacío para el análisis del viento y así asegurar que se repliquen las condiciones experimentales (Blocken *et al.* 2007, Parente *et al.* 2011, Cindori *et al.* 2018). Posteriormente se incluyó la geometría de un heliostato escala 1:20 dentro del dominio computacional y se monitorearon los campos de velocidad y presión, así como las fuerzas de arrastre, sustentación y momento de volcamiento.

En la figura 2 se muestra el modelo físico estudiado, con dimensiones 1.0 x 1.0 x 2.0 m (ancho, alto y largo), el heliostato se colocó a 0.5 m de la entrada. Estas dimensiones cumplen con las proporciones recomendadas por Abu-Zidan *et al.* 2021 para estudios de ingeniería del viento y el área de bloqueo del heliostato es menor al 3.0% tal y como se recomienda en Franke *et al.* 2007.

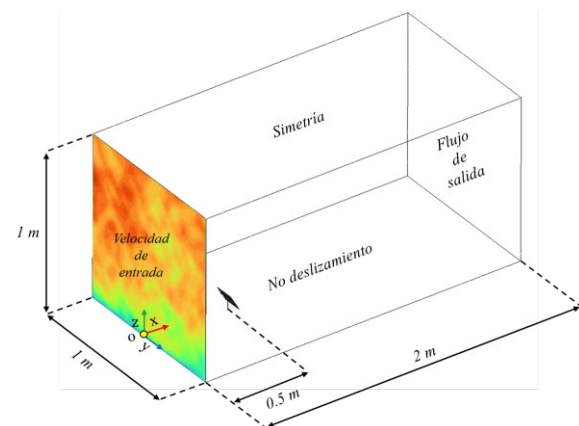


Figura 2. Modelo físico.

Las simulaciones se llevaron a cabo en el software ANSYS Fluent 2022 R-2, se utilizó el modelo de turbulencia LES, modelo de subescala Smagorinsky Lilly con $C_s = 0.1$, el esquema de acoplamiento presión velocidad utilizado fue el SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure*), el esquema de discretización para la presión fue el estándar y *Second Order Upwind* para momentum. La condición frontera a la entrada es (5), la cual se generó en el software Matlab e integrada a la simulación mediante el uso de UDFs (*User Defined Functions*). En la parte superior se impuso la condición de simetría, la salida se consideró como flujo de salida y todas las paredes se consideraron como superficies lisas (no deslizamiento). Se simularon 1700 pasos de tiempo con un $\Delta t=0.00286$ segundos, generando 4.86 segundos de simulación (dominio vacío) y 1295 pasos de tiempo (3.7 segundos) para el dominio con heliostato. Se consideró como criterio de convergencia un residual global menor a 1×10^{-3} para la ecuación de continuidad y 1×10^{-6} para momentum. El análisis de datos se llevó a cabo mediante múltiples programas en Python, las librerías utilizadas fueron: CSV para la lectura de archivos, NumPy para cálculos estadísticos y matplotlib para visualización de resultados.

4. RESULTADOS

El primer estudio que se realizó fue probar 3 distintos algoritmos de acoplamiento presión velocidad con el objetivo de observar si había cambios significativos en el comportamiento del flujo. Los algoritmos probados fueron el anteriormente mencionado SIMPLE, SIMPLEC (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent*) y PISO (*Pressure-Implicit Splitting of Operators*). Como se puede observar en la tabla 2, las diferencias de los perfiles en la zona de incidencia son bajas, para la velocidad se encontró una diferencia promedio del 0.23% entre el algoritmo SIMPLEC y SIMPLEC y 0.98% entre el algoritmo SIMPLEC y PISO. Para la intensidad turbulenta fue una diferencia promedio de 0.68% entre el algoritmo SIMPLE y SIMPLEC y 0.97% entre el algoritmo SIMPLEC y PISO. Se analizaron también las diferencias en la zona de entrada y de aproximación, sin embargo, ese estudio no se incluyó debido a que eran muy pequeñas, además la zona de interés es la zona de incidencia ya que es donde se posicionara posteriormente el heliostato para la obtención de las cargas aerodinámicas.

Tabla 2. Perfiles en la zona de incidencia.

Altura	U/U _{ref}		I _u			
z/z _{ref}	SIMPLE	SIMPLEC	PISO	SIMPLE	SIMPLEC	PISO
0.0749	0.6954	0.6968	0.6830	0.3382	0.3365	0.3334
0.1018	0.7087	0.7100	0.6966	0.3277	0.3264	0.3233
0.1766	0.7563	0.7563	0.7457	0.2885	0.2886	0.2855
0.2581	0.7901	0.7906	0.7807	0.2633	0.2623	0.2612
0.4078	0.8503	0.8511	0.8430	0.2157	0.2142	0.2148
0.5641	0.8977	0.8990	0.8920	0.1822	0.1811	0.1823
0.7000	0.9340	0.9361	0.9293	0.1572	0.1555	0.1576
1.0132	0.9863	0.9895	0.9831	0.1364	0.1347	0.1372
1.4617	1.0459	1.0492	1.0434	0.1231	0.1218	0.1236
1.6180	1.0563	1.0597	1.0540	0.1207	0.1195	0.1213
2.3862	1.1267	1.1313	1.1258	0.1100	0.1105	0.1106
2.9844	1.1550	1.1602	1.1542	0.1084	0.1094	0.1083

En la figura 3 se presentan los perfiles de velocidad obtenidos en tres zonas distintas del dominio computacional (entrada, aproximación e incidente). La diferencia promedio del perfil de velocidad en la zona de aproximación respecto al de la entrada es de 0.82%, mientras que la diferencia promedio del perfil incidente respecto al de aproximación es de 0.26%.

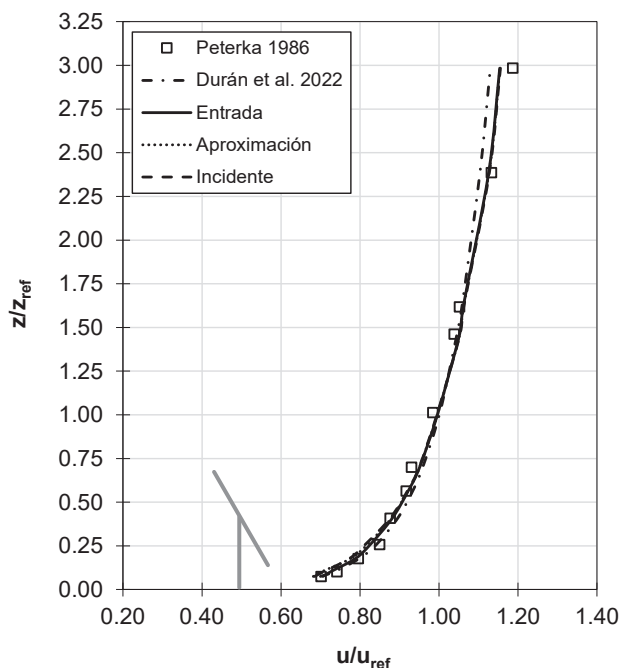


Figura 3. Perfiles de velocidad obtenidos.

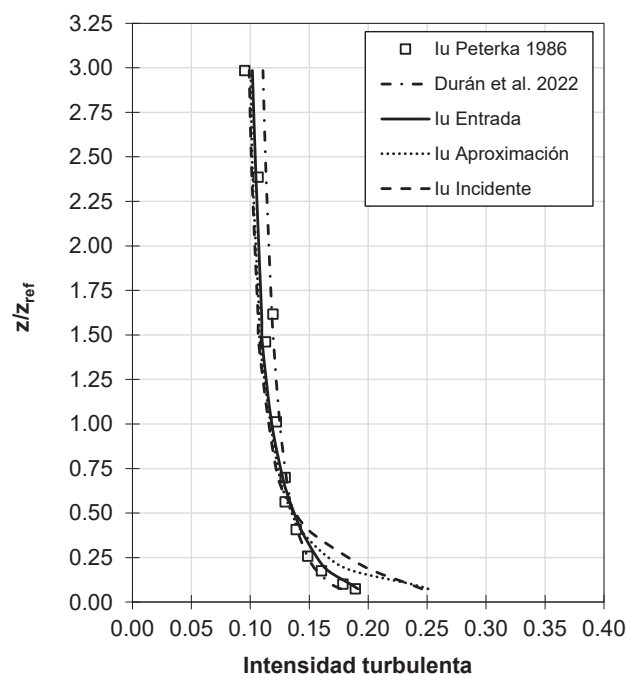


Figura 4. Perfiles de I_u obtenidos.

La intensidad turbulenta se calcula mediante $I_u = u_{rms}/U$, donde U es el valor medio y u_{rms} es la desviación estándar de las de las velocidades monitoreadas a las distintas alturas z/z_{ref}. La diferencia promedio del perfil I_u en la zona de aproximación respecto al de la entrada es de 7.40% mientras que el perfil de la zona de incidencia respecto al de aproximación es de 2.90%. Estos resultados para la velocidad e intensidad turbulenta

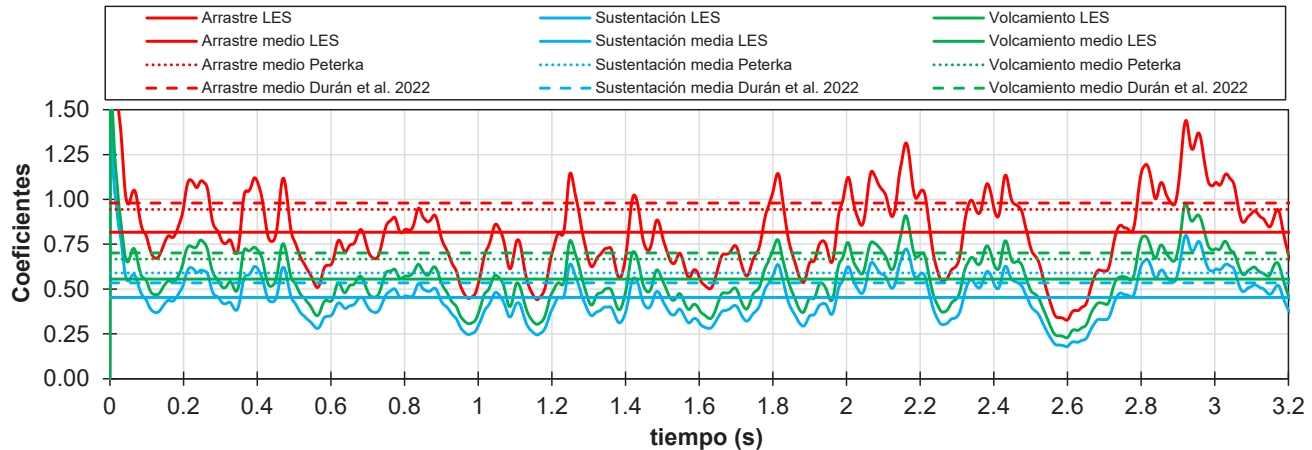


Figura 5. Evolución de los coeficientes aerodinámicos para un ángulo de elevación $\alpha=30^\circ$.

muestran que los perfiles propuestos a la entrada viajan por el dominio sin deformarse hasta la zona de incidencia, lo cual es una condición deseable ya que en esa zona se colocará posteriormente el heliostato. Como se puede observar en la figura 4, es el perfil Iu el que sufre mayores cambios en la parte cercana al suelo, lo cual se debe principalmente a que los flujos de ABL son altamente turbulentos en todas direcciones y al estar cerca de una pared (no deslizamiento) el efecto turbulento se acentúa.

En la figura 5 se observa la evolución de los coeficientes aerodinámicos de arrastre, sustentación y volcamiento para un heliostato con un ángulo de elevación de 30° y su comparación con los valores medios reportados por Peterka *et al.* 1986 y Durán *et al.* 2022. Se probaron 2 esquemas de discretización para momentum: *Second Order Upwind* y *Bounded Central Differencing*, donde no se observó diferencias significativas en los coeficientes obtenidos.

Posteriormente se obtuvieron los valores medios, desviaciones estándar (σ) o valores RMS (*Root Mean Square*) y pico de dichas cantidades, donde el valor pico se calculó mediante $F_{peak} = \bar{F} + 3\sigma_F$ (Emes *et al.* 2019), siendo $\bar{F}$ el valor medio del coeficiente. Los valores experimentales del volcamiento se obtuvieron mediante $C_{My} = C_{MHy} + C_{Fx} (HCL/L_{ref})$ (Peterka *et al.* 1987), donde HCL es la altura del suelo al centro del tubo de torque, en este caso HCL=0.0654 m (figura 1); en Sosa *et al.* 2022 se observa este mismo comportamiento.

Las diferencias porcentuales para las cantidades medias de arrastre, sustentación y volcamiento respecto a las de Peterka *et al.* 1986 fueron -14.16%, -23.27% y -13.34%, respectivamente, mientras que en Durán *et al.* 2022 se reportaron errores del 3.02%, -9.32% y 9.43%. Se observa que en el presente estudio existe una subestimación de las tres cantidades medias, sin embargo para el caso de las cargas pico se obtuvieron diferencias del 0.72%, 2.35% y -9.21% respecto a los datos experimentales.

Un efecto muy particular se detectó al analizar la historia de los coeficientes y fue que todos seguían el mismo comportamiento, con la diferencia de que variaban en magnitud mostrando una clara relación entre ellos. Falta confirmar que este efecto se presente en otras condiciones de operación (ángulo de inclinación).

5. CONCLUSIONES

Se presenta un estudio numérico sobre la generación de un flujo de capa límite atmosférica y la obtención de los coeficientes aerodinámicos de arrastre, sustentación y volcamiento medios y pico mediante la técnica CDRFG, la cual permite replicar el perfil medio de velocidad, los perfiles de intensidad turbulenta, el tamaño de remolinos y espectros turbulentos de condiciones experimentales.

Basados en los resultados, concluimos lo siguiente:

1. La técnica CDRFG permite replicar las condiciones experimentales generadas en un túnel de viento de capa límite atmosférica.
2. No se observaron diferencias significativas en los perfiles de velocidad media e intensidad turbulenta u , utilizando tres distintos algoritmos de acoplamiento presión-velocidad (SIMPLE, SIMPLEC, PISO).
3. No se observaron diferencias significativas en los coeficientes aerodinámicos utilizando dos distintos esquemas de discretización para momentum (*Second Order Upwind* y *Bounded Central Differencing*).
4. Se encontró buena concordancia entre las cargas pico reportadas experimentalmente y las obtenidas mediante el modelo LES y la técnica CDRFG.
5. Se observó una subestimación de los coeficientes aerodinámicos medios.

6. REFERENCIAS

- Aboshosha, H., Elshaer, A., Bitsuamlak, G.T., Damatty, A.E., 2015. Consistent inflow turbulence generator for LES evaluation of wind-induced responses for tall buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 142, 198-216.
- Abu-Zidan, Y., Mendis, P., Gunawardena, t., 2021. Optimizing the computational domain size in CFD simulations of tall buildings. *Heliyon*, 7, e06723.
- Asgari, E., Saeedi, M., Etemadi, M., 2022. Large-eddy simulation of a developing turbulent boundary layer over wall-mounted hemisphere under the influence of surrounding ditch: Flow characteristics and aerodynamic forces. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 227, 105047.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*, 47, 238-252.
- Buffa, E., Jacob, J., Sagaut, P., 2021. Lattice-Boltzmann-bases large eddy simulation of high-rise building aerodynamics with inlet turbulence reduction. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 212, 104560.
- Chen, W., Zhu, Z., 2020. Numerical simulation of wind turbulence by DSRFG and identification of the aerodynamic admittance of bridge decks. *Engineering applications of computational fluid mechanics*, 14, 1515-1535.
- Durán, R.L., Hinojosa, J.F., Sosa-Flores, P., 2022. A novel approach for computational fluid dynamic analysis of mean wind loads on heliostats. *Journal of solar energy engineering*, 144,061008-1.
- Emes, M. J., Arjomandi, M., Graham, J. Nathan, 2015. Effect of heliostat design wind speed on the levelized cost of electricity from concentrating solar thermal power plants. *Solar Energy* 115, 441-451.
- Emes, M. J., Jafari, A., Ghanadi F., Arjomandi, M., 2019. Hinge and overturning moments due to unsteady heliostat pressure distributions in a turbulent atmospheric boundary layer. *Solar Energy* 193, 604-617.
- Emes, M.J., Jafari, A., Arjomandi, M., 2022. A feasibility on the application of mesh grids for heliostat wind load reduction. *Solar Energy* 240, 121-130.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H., Carissimo, B., 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. *Cost*, 732.
- Guichard, R., 2019. Assessment of an improved random flow generation method to predict unsteady wind pressures on an isolated building using large-eddy simulation. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 189, 304-313.
- IRENA, 2010. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Concentrating Solar Power, Volume 1: Power Sector Issue 2/5. International Renewable Energy Agency.
- IRENA, 2022. Trends in Renewable Energy. <http://www.irena.org/Statistics>.
- Jafari, A., Ghanadi, F., Arjomandi, M., Emes, M.J., Cazzolato, B.S., 2019. Correlating turbulence intensity and length scale with the unsteady lift force on flat plates in an atmospheric boundary layer flow.
- Li, Y., Cheng, C., Lo, Y., Fang, F., Zheng, D., 2015. Simulation of turbulent flows around a prism in suburban terrain inflow based on random flow generation method simulation. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 146, 51-58.
- Lu, C.L., Li, Q.S., Huang, S.H., Chen, F.B., Fu, X.Y., 2012. Large eddy simulation of wind effects on a long-span complex roof structure. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 100, 1-18.
- Marais, M.D., Craig, K.J., Meyer, J.P., 2015. Computational Flow optimization of heliostat aspect ratio for wind direction and elevation angle. *Energy Procedia*, 69, 148-157.
- McMullan, W.A., Angelino, M., 2022. The effect of tree planting of traffic pollutant dispersion in an urban street canyon using large eddy simulation with a recycling and rescaling inflow generation method. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 221, 104877.
- Parente, A., Gorlé, C., Van Beeck, J., Benocci, C., 2011. A Comprehensive Modelling Approach for the Neutral Atmospheric Boundary Layer: Consistent Inflow Conditions, Wall function and Turbulence Model. *Boundary Layer Meteorology*, 140, 411-428.
- Peterka, J.A., Hosoya, N., Bienkiewicz, B., Cermak, J.E., 1986. Wind Load Reduction for Heliostats, SERI/STR-253-2859 DE86010703. Solar Energy Research Institute.
- Peterka, J.A., Tan, Z., Bienkiewicz, B., Cermak, J.E., 1987. Mean and peak wind load reduction on heliostats. SERI/SRT-253-3212 DE87012281. Solar Energy Research Institute.
- Peterka, J.A., Tan, Z., Cermak, J.E., Bienkiewicz, B., 1989. Mean and peak wind loads on heliostats. *ASME J. Sol. Energy Eng.*, 111(2),158-164.
- Poulain, P.E., Craig, K.J., Meyer, J.P., 2016, May. Influence of the gap size on the wind loading on heliostats. *AIP Conference Proceedings* 1734,020019.
- Ricci, M., Patruno, L., Kalkman, I., Miranda, S., Blocken, B., 2018. Towards LES as a design tool: Wind loads assessment on high-rise building. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 180, 1-18.
- Sosa-Flores, P., Hinojosa, J.F., Durán, R.L., 2022. Computational fluid dynamics study of the rear geometry influence on aerodynamic load coefficients of heliostats in stow position. *Solar energy*, 241, 130-156.
- Vasilopoulos, K., Lekakis, I., Sarris, I.E., Tsoutsanis, P., 2021. Large eddy simulation of dispersion of hazardous materials released from a fire accident around a cubical building. *Environmental Science and Pollution Research*, 28,50363-50377.
- Yoshikawa, M., Tamura, T., 2012. LES for wind load estimation by unstructured grid system. The seventh international colloquium bluff body aerodynamics and applications. Shanghai, China.

Diseño y Manufactura de una Máquina Sandblasting de Alta Precisión para el Manejo de Materiales Cerámicos, Dirigida a Pymes.

José Antonio Nieto Sosa*. Alan Pérez Mendoza**

*Tecnológico Nacional de México, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México CP 54070 (Tel: 5547208084; e-mail: M13250383@tlalnepantla.tecnm.mx ORCID ID: 0009-0003-6994-9599).

** Tecnológico Nacional de México, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México CP 54070 (Tel: 5535742830; e-mail: alan.pm@tlalnepantla.tecnm.mx ORCID ID: 0009-0007-8383-3575).

Abstract:

This research work shows the results in the design and manufacture of a sandblasting machine, with the objective of engraving ceramic pieces of versatile size, with high precision, which was designed with quality standards and ergonomic design criteria, easy cleaning, and maintenance, being its main focus the graphic arts market.

Palabras clave: Vidrio, Sandblasting, Chorro de abrasivo, Succión, Aire a presión, Tecnología, Artesanal.

1. INTRODUCCIÓN

El vidrio es uno de los principales productos que se comercializa en el sector de la construcción debido a su amplia variedad de estilos y siendo de relevancia en la sociedad actual, por sus diversas aplicaciones como lo pueden ser; decoración de interiores, ventanas, puertas, por mencionar algunos.

Con base a lo antes mencionado, existe una técnica novedosa y creativa que integra de forma perfecta las necesidades del consumidor, buscando productos y servicios de excelente calidad, con diseños auténticos e únicos, mediante la técnica conocida como sandblasting, que consiste en opacar o quitar el brillo al vidrio o espejo a través de chorros a presión de abrasivo, donde se obtienen grabados y amplia gama de diseños en ventanas, espejos, cancelas, entre otros usos, siendo este un proceso artesanal, que se ubica en un mercado en vías de desarrollo, dirigido de esta manera a un sector muy fuerte [1].

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo diseñar y fabricar una máquina de sandblast dirigida para pequeñas y medianas empresas que sea ergonómica, de fácil limpieza y transportación con altos estándares de calidad al producto, brindando seguridad del operador [2].

2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Problema de investigación

Una problemática detectada en el uso de una máquina de sandblasting es hacerlo portátil, debido a sus grandes dimensiones y peso estructural. Con lo antes mencionado el

traslado se complica por su composición operativa del dispositivo debido que cuenta con tanques de volumen considerable.

Abordando esta área de oportunidad la ingeniería de diseño y manufactura a establecido una solución para las dificultades de transporte además de reducir el tiempo de trabajo, disminución de desgaste físico, y aumentando la calidad del trabajo a realizar. Esto originado por el mercado al que se enfoca este prototipo que son las Pymes; estas empresas constituyen alrededor del 70 % de las empresas a nivel nacional con base en estadísticas del INEGI.

Objetivos.

General:

Diseñar y fabricar un equipo de sandblasting, para las Pymes con enfoque dirigido en artes gráficas que permita el grabado de piezas cerámicas versátiles, cumpliendo las normas de seguridad industrial y altos estándares de calidad.

Específicos:

- Analizar la información técnica-teórica para la presente investigación.
- Implementar un sistema de precisión en el control del chorro de abrasivo para evitar la falla de los materiales en su elaboración.
- Elaborar un circuito cerrado para uso continuo con piezas de tamaño moderado.
- Diseñar un colector de residuos para la recuperación continua del carburo de silicio.

Referentes teóricos

El primer antecedente que se conoce del sandblast, tiene lugar en Inglaterra, Reino Unido, (agosto de 1870), Benjamín C. Tilgman observó, como los cristales de las ventanas se opacaban con el constante piquetear de la arena, cuando el viento soplabla. Así, comenzó a experimentar hasta que poco a poco fue desarrollando métodos que facilitaban y aceleraban este proceso. Con base a esta experimentación inventó una máquina para sopleteo con chorro de abrasivos, que patentó con el número 2147. Esta máquina ha sido transformada a través del tiempo para cumplir con diferentes objetivos, pero el principio de funcionamiento siempre ha sido el mismo [3].

La palabra “sandblast” proviene de los vocablos en inglés “sand” que significa arena, y “blast” que significa presión, por lo cual el término hace relación a la técnica llamada “arena a presión” sin embargo este sistema no emplea necesariamente arena para su funcionamiento pudiendo utilizar diversos abrasivos a presión. El “sandblast” remueve toda la corrosión, inclusive aquella de los cráteres más profundos sin desgastar de manera importante el material. Además, proporciona a la superficie un acabado ligeramente marcado que sirve de anclaje para volver a recubrir [4].

Bajo el mismo principio de funcionamiento de este proceso sus aplicaciones en el campo de la industria son diversas tanto como el enfoque para materiales metálicos y cerámicos; Esta técnica específicamente en vidrio consiste en dejarlo expuesto, y que radica en el grabado o esmerilado de la superficie del cerámico con pistola a chorro de arena, es usado en vidriería para realizar acabados y estampados de siluetas en la superficie [5].

Tipos de abrasivo

Tabla 1. Cuadro comparativo papel Frost vs Sandblasting [1].

	Papel frost	Sandblasting
Características	- Adherencia de papel vinilo por medio de transferencia	- Elimina el brillo por una o ambas caras del vidrio por medio de un chorro a presión de arena. - También es utilizado para la limpieza de piezas metálicas.
Ventajas	- Es posible retirar el diseño adherido y cambiarlo - Más económico en comparación de otros procesos	- Es una técnica que no se deteriora con el tiempo - Permite tener gran variedad de diseños - Es posible agregar color a los diseños
Desventajas	- Detalles pequeños o puntas muy finas, tienden a desprenderse de la superficie - Es delicado al momento de limpiar, si entra líquido entre el papel y el vidrio, pierde adherencia - No tiene variedad en su aplicación	- No se puede modificar los diseños - Costos más altos
Aplicaciones	- Oficinas modulares, puertas de vidrio, ventanas, fachadas	- Oficinas modulares, puertas de vidrio, ventanas, fachadas, espejos, muebles, piezas metálicas, entre otros.

El tipo de abrasivos determinará el costo y la efectividad de la limpieza con chorro de arena, entre los factores relacionados con el abrasivo que afectan el desempeño del equipo se encuentran:

1.- Tamaño: el tamaño de las partículas del abrasivo es sumamente importante para lograr un patrón de textura consistente al aplicar el chorro de abrasivo en la superficie, los fabricantes de abrasivo utilizan varias nomenclaturas y numeraciones para definir el tamaño de sus productos.

2.- Forma: las diferentes formas en los abrasivos ofrecerán diferentes perfiles en la superficie siendo las dos principales configuraciones de los abrasivos, la angular y las esféricas. Los abrasivos angulares trabajan mejor cuando se trata de desprender capas pesadas de pintura y corrosión. El abrasivo esférico en cambio es mejor para remover escamas de fabricación y contaminación ligera, también el utilizado para realizar el martilleo (shot peening) para el relevado de esfuerzos. El martilleo crea una superficie uniforme comprimida que hace que los resortes y otros metales sujetos a alta tensión tengan mucho menos posibilidades de fallar.

3.- Densidad: el peso del abrasivo por volumen. Esta es la característica menos determinante que se tiene que tomar en cuenta para realizar un trabajo de sandblast, a menos que la diferencia de densidades sea muy amplia entre los distintos materiales. En la medida en que el material sea más denso, será mayor la energía con la que se impacte contra la superficie.

4.- Dureza: la dureza de abrasivo determinará su efecto sobre la superficie que va a ser sandblastada. Si el abrasivo es más duro que el sustrato, dejara un perfil sobre la superficie. Si es más suave que la superficie, pero más dura que el recubrimiento, solamente removerá el recubrimiento. Si es más suave que el recubrimiento, solamente limpiará la contaminación de la superficie sin remover el recubrimiento.

5.- Fragilidad: es la tendencia del abrasivo a fragmentarse en partículas más pequeñas como consecuencia del impacto, mientras más frágil sea el abrasivo, menos veces puede ser reutilizado y más polvo generará [6].

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el diseño y fabricación del dispositivo de sandblasting, se emplea para la elaboración de máquinas diferentes a las que se comercializan en el mercado de las industrias graficas. Los pasos secuenciales que se llevaron a cabo en la formación de este producto fueron:

1. Estudio de mercado. Es el punto de partida de la metodología, tiene como objetivo detectar las necesidades del cliente y el mercado en dicho sector antes mencionado, la magnitud del mismo, su ubicación geográfica y algunas otras características. Debe dar, además, una idea clara del precio que dichos usuarios o consumidores pueden pagar por el producto, para conocer su viabilidad en el mercado.

2. Características del producto. Es la interpretación de las necesidades en el mercado traduciendo hacia las características

generales del dispositivo final, teniendo como guía los criterios de diseño, especificaciones y restricciones.

3. Dibujo previo. Consiste en realizar un diseño preliminar abordando las especificaciones de la máquina de sandblasting que den respuesta a las necesidades de diseño.

4. Esquemas. Es la representación ordenada de los componentes normalizados para la visualización técnica de la perspectiva de como interactúan los elementos y mecanismos de la máquina.

5. Cálculos. Son los fundamentos en expresión matemática que sustenta la selección de elementos, y propiedades mecánicas del equipo de sandblasting, apoyado de un análisis dimensional.

6. Dibujos de estudio. De forma secuencial es la manera en que va tomando la apariencia final la máquina a través del proceso de ensamble, afin de identificar deficiencias en el diseño.

7. Prototipo. Es la consolidación de la máquina en físico, utilizando diversos procesos de manufactura tales como: soldadura por arco eléctrico, corte por cizalla, rolado en frío.

8. Pruebas de funcionamiento. Son una serie de evaluaciones de los diferentes sistemas que componen el equipo como: sistema eléctrico y neumático cumpliendo lo especificado en los criterios de diseño.

9. Dibujos de detalle. De forma precisa establece una visión geométrica para apreciar de forma detallada su contenido.

10. Dibujos de conjunto. Es la definición de una relación física que guardan las piezas vistas como un subconjunto, estableciendo una nomenclatura con números o letras de cada uno de los elementos que forman el sistema.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Resultados

Estudio de mercado.

De acuerdo con la información obtenida mediante esta herramienta se determinó que el equipo es viable, dentro del mercado de interés (Pymes) dentro de la zona geográfica del Valle de México; implementado una encuesta para la recolección de datos dirigida a la industria de artes gráficas, cuantificando datos favorables lo cual permitió la consolidación del objetivo.

Características del producto.

Dispositivo ergonómico, Costeable al sector, Mantenimiento menor, Fácil limpieza y acceso, Seguro para el operario, De fácil transporte, Presión ajustable de 1 a 8 bar.

Dibujo previo.

Se presenta la propuesta idónea para la distribución y acomodo del equipo de sandblasting de manera preliminar cumpliendo los criterios de diseño antes establecidos (Figura 1).



Figura 1. Vista Frontal [1].

Esquemas.

Los esquemas necesarios para la operación de la máquina de sandblast (Figura 2 a y b) son:

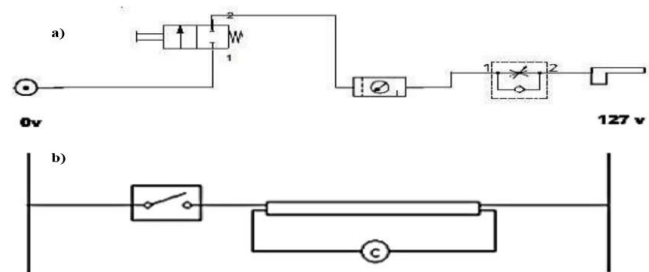


Figura 2. a) Esquema neumático b) Esquema cinemático [1].

Cálculos.

Las expresiones matemáticas empleadas en el diseño y consolidación del presente proyecto de sandblasting va desde el estudio en: *componentes neumáticas* (compresor, mangueras, equipo de succión, pistola de granallado, unidad de mantenimiento, válvulas de cierre y apertura). En segunda instancia *partes estructurales* (cabinas, rodajas, cerrojo, sistema de sujeción). Por último, la selección de *piezas eléctricas* (ventilador, lampara, interruptores, cable, conexiones)

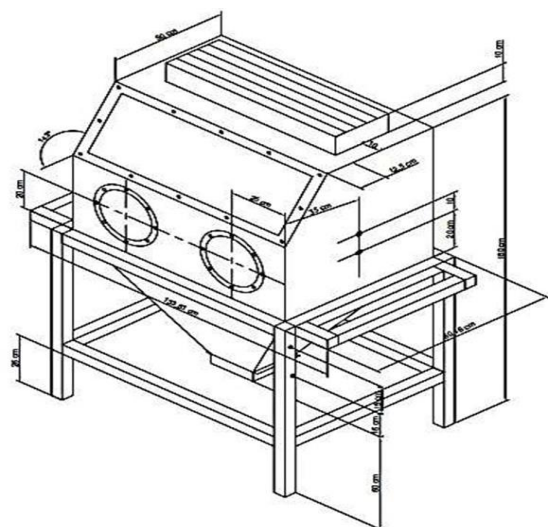


Figura 3. Conjunto de elementos normalizados para la cabina [1].

Dibujos de estudio.

Se presenta el bosquejo técnico del equipo de sandblasting basado en el producto final.

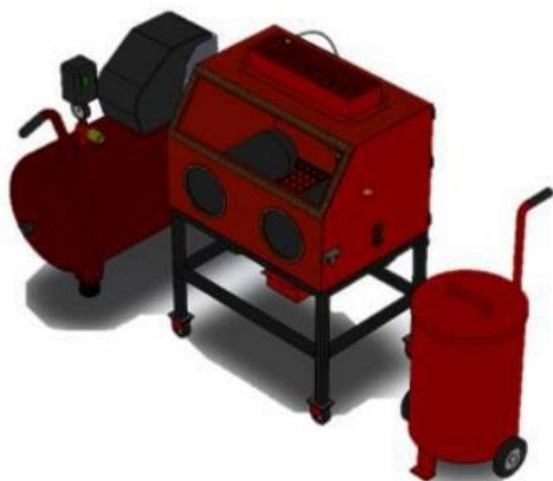


Figura 4. Dibujo basado en el producto final [1].

Prototipo.

Las imágenes resultantes del ensamble del equipo de sandblasting materializadas de manera física y funcional.



Figura 5. Fotografía de fase final [1].

Pruebas de funcionamiento.

A través de una serie de pruebas se confirmó el correcto desempeño de la máquina de sandblasting, estos ensayos consisten en:

- Prueba de operación: consiste en introducir el producto cerámico dentro de la cabina, previamente montado el diseño de la mascarilla de vinil con un tiempo promedio de 95 s en el mismo; con una presión inicial de 8 bar se activa el equipo de succión abriendo paso a el chorro de

arena para completar el proceso de desbaste con un tiempo de 16 s en promedio.

Tabla 2. Resultados prueba de operación [1].

MATERIAL	TIPO DE PRODUCTO	CANTIDAD	MODELO DE MASCARILLA	TIEMPO DE PEGADO DE MASCARILLA (MIN)	TIEMPO DE DESPEGADO DE MASCARILLA (SEG)	GROSOR DEL VIDRIO (MM)	TIEMPO DE DESBASTE (SEG)	TIEMPO TOTAL (MIN)
Vidrio	Vaso Jaibol	1	Lagarto	1.00	40	3.74	10	1.50
Vidrio	Tarro de 500ml	1	Calavera con pistones	1.15	40	5.62	21	2.16
Vidrio	Cenicero	1	Calavera con pistones	1.02	40	6.02	18	1.60

- Prueba de fuga de presión de aire: es un procedimiento no destructivo en donde se pone en funcionamiento el dispositivo con una mezcla de agua y surfactante en donde se puede visualizar a simple inspección si el equipo tiene una pérdida y repararla a la brevedad. Como resultado se detectó 0 % de pérdida de presión de aire visualizado en el manómetro del compresor.
- Prueba de sellado de cabina: este proceso se compone de llevar al límite los sellos y retenes situados en los vértices de la cabina de trabajo, detectando posibles pérdidas de abrasivo en el ciclo de operación del dispositivo. El abrasivo empleado fue el carburo de silicio es duro, afilado y costoso tiene de acuerdo a su tamaño de partícula una clasificación de 13 en la escala de Mohs esto hace referencia a que es un abrasivo de polvos pequeños, en esta prueba se detecto un 0 % de pérdida de abrasivo a través de las áreas de vulnerabilidad en la cabina.

Dibujos de detalle.

Establece de forma específica los elementos que conforman el dispositivo, haciendo referencia a sus características geométricas, tolerancias y normalización.

Dibujos de conjunto.

En la Figura 6, se muestran los componentes del equipo de Sandblast, descritos en la Tabla 3.

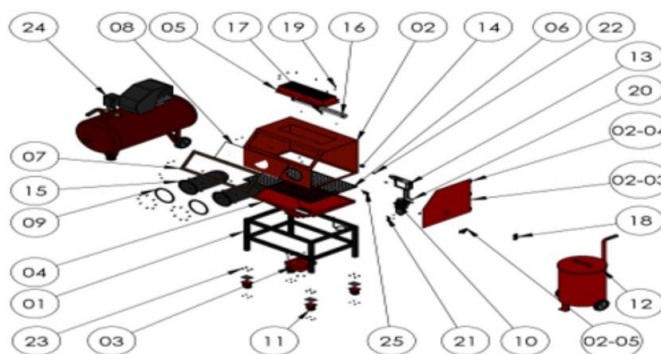


Figura 6. Dibujo de Explosión [1].

Tabla 3. Lista de componentes [1].

Numero de parte	Descripción
1	Estructura
2	Cabina
02-03	Puerta cabina
02-04	Bisagra
02-05	Pasador
3	Contenedor
4	Tolva
5	Conducto de ventilación
6	Charola de posición de productos
7	Marco de acrílico
8	Acrílico
9	Marco de guantes
10	Unidad de mantenimiento
11	Rodajas
12	Tanque de almacenamiento
13	Pistola de succión
14	Boquilla
15	Guantes
16	Lámpara Fluorescente
17	Conductor
18	Clavija ovalada
19	Remache
20	Manguera
21	Abrazadera omega
22	Abrazadera
23	Tornillos
24	Compresor

Tabla 4. Comparativa de un equipo en el mercado vs diseño propio.

Equipo de sandblasting marca: Torin Modelo: TR4092	Equipo de sandblasting de creación propia
- Presión máxima de servicio: 8bar. - Alimentación eléctrica: tres vías. - Desplazamiento: exclusivamente fija. - Precio: \$17000 IVA incluido.	- Presión máxima de servicio: 12bar. - Alimentación eléctrica: dos vías. - Desplazamiento: fija y móvil. - Precio: \$16000 IVA incluido.

5. CONCLUSIONES

Resumen de resultados.

El análisis de dicha problemática pudo implementar una metodología capaz de proyectar un equipo de sandblast competente en la industria Pymes, cumpliendo las normas de seguridad industrial y altos estándares de control. El circuito cerrado permite el uso continuo de grabado de piezas pequeñas, controlando un sistema de precisión en la presión y el caudal del abrasivo. Se elaboró con materiales calculados y debidamente seleccionados en cada catalogo correspondiente a cada elemento.

Conclusiones.

El equipo de sandblasting se logró mediante una correcta implementación metodológica, enfocado en la elaboración de accesorios artesanales la CANAGRAF (Cámara Nacional de la industria de artes gráficas) con los diseños más novedosos, demostrando su gran funcionalidad en el mercado. La accesibilidad del sandblast, puede tener una fácil adquisición, ya que los costos son bajos comparados a los productos que se encuentran en el mercado, llevando consigo un fácil manejo, limpieza y resistencia ante los trabajos dentro de la cabina.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Caldas Santamaria, "Diseño de modelo de negocio en la industria de Sandblasting," 2016.
- [2] J. A. N. Sosa, "Sandblastec," Metal mecánica, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, México, 2017.
- [3] C. M. Automation, "Employment, Education, and the Workplace," *Washington: US Government Printing Office.—1984.—471 p*, 1984.
- [4] L. C. V. TERAN, "DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES."
- [5] R. Pérez Hidalgo, "Diseño de maquina granalladora," Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería ..., 2021.
- [6] E. S. Lugo, "Estudio de la influencia de los parámetros del proceso de sandblast sobre acabado superficial de placas metálicas de acero AISI 1018. Caso de estudio: Construcciones industriales Tapia," 2017.

Análisis computacional de cargas aerodinámicas en heliostatos concentradores

M.E. Hinojosa-Trujillo, E. Padilla-Gucho, R.L. Durán, J.F. Hinojosa

Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000
(e-mails: a218209800@unison.mx, a218201383@unison.mx, a218230072@unison.mx, fernando.hinojosa@unison.mx).

Resumen: Se presenta un análisis computacional de las cargas aerodinámicas en heliostatos concentradores debido a un flujo de capa límite atmosférica utilizando un modelo de turbulencia k- ϵ considerando que la viscosidad turbulenta varía con el campo de velocidad. Se utilizaron funciones de pared modificadas en la parte inferior del dominio computacional para mejorar la homogeneidad horizontal del flujo. Se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos de arrastre, sustentación y volcamiento sobre el heliostato para diferentes ángulos de elevación. Se observó buena concordancia respecto a valores experimentales obtenidos mediante túnel de viento reportados en la literatura especializada. El error promedio para el coeficiente de arrastre fue de 4.2%, para la sustentación fue de 6.2% y para el volcamiento 5.7%.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, capa límite atmosférica, heliostato, aerodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el cambio climático derivado del calentamiento global de nuestro planeta existe una tendencia a migrar a tecnologías de generación de energía que no produzcan gases de efecto invernadero. Lo anterior se constata observando que, en los últimos diez años, la capacidad instalada de plantas solares térmicas ha aumentado desde los 1,266 MW hasta 6,479 MW (IRENA, 2021). Dentro de este tipo de sistemas, se encuentran las Plantas de Torre Central (PTC), donde uno de los elementos clave es el campo de heliostatos, quienes se encargan de concentrar la radiación solar en un receptor térmico ubicado en la parte superior de una torre. El campo de heliostatos representa aproximadamente el 30% del costo de construcción de una PTC (Emes, 2015, IRENA, 2010). Por lo que, para reducir el costo nivelado de la electricidad para una PTC se requiere la optimización del diseño de los heliostatos (Emes *et al.*, 2015). Por otro lado, una PTC, también se puede utilizar para aportar la energía térmica requerida para un proceso termoquímico endotérmico (Yadav and Banerjee, 2016). En este caso, los heliostatos concentradores pueden ser una mejor alternativa para proporcionar densidades energéticas mayores al receptor o reactor químico.

Los heliostatos al operar interactúan con el aire atmosférico, lo que produce gradientes de presión entre las superficies inferior y superior de los espejos. Esto se traduce en esfuerzos mecánicos para la estructura y los sistemas de seguimiento, derivando en errores de seguimiento y en ocasiones en afectaciones más severas. En la literatura se han reportado varios estudios sobre las Cargas de Viento en Heliostatos (CVH) considerando: la orientación de viento, la inclinación de los espejos, la relación de aspecto, la turbulencia del viento, y la distancia del espejo al

suelo (Peterka *et al.*, 1989; Wu *et al.*, 2010; Pfahl and Uhlemann, 2011; Poulain and Meyer, 2015; Mammar *et al.*, 2018; Emes *et al.*, 2019).

A continuación, se describen brevemente algunos de los estudios teóricos más representativos.

Marais *et al.* (2015) estudiaron teóricamente las CVH en heliostatos con distintas relaciones de aspecto. Para simular la superficie rugosa del suelo, utilizaron funciones de pared del tipo k_s , sus resultados muestran una subestimación de los coeficientes aerodinámicos en relación con resultados experimentales. Poulain *et al.* (2016) realizaron estudios numéricos sobre la separación de las facetas (espejos) en heliostatos y su influencia en las CVH, en el suelo del dominio computacional impusieron un esfuerzo cortante constante. Se observó una subestimación de los coeficientes entre el 18% y el 26%. Durán *et al.* (2022) reportaron una formulación modificada del modelo de turbulencia k- ϵ para estudiar las CVH en heliostatos para diferentes ángulos de elevación. Se obtuvo una buena concordancia entre los datos numéricos y los datos experimentales obtenidos en túnel de viento. Sosa *et al.* (2022) usaron la simulación de remolinos grandes (LES) para estudiar el efecto de cuatro configuraciones de la superficie trasera de un heliostato en posición de reposo, sobre las CVH. Se observaron diferencias de hasta 128 % en el coeficiente de arrastre.

La revisión de literatura realizada mostró que no hay estudios teóricos de las CVH en heliostatos concentradores, los cuales, al tener una superficie curva, pueden presentar variaciones importantes con respecto a los heliostatos convencionales que cuentan con superficies reflectoras planas.

2. MODELO MATEMÁTICO

Las ecuaciones gobernantes que describen el problema físico en este estudio son las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS) se presentan a continuación en notación tensorial, donde los subíndices denotan las direcciones x, y, z.

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momentum

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}] \quad (2)$$

El modelo de turbulencia utilizado en este estudio fue el k-ε estándar:

Ecuación de energía cinética turbulenta k:

$$\frac{\partial [\rho k]}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \bar{u}_j k - r^{(k)} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \rho [P^{(k)} - \varepsilon] \quad (3)$$

Ecuación de disipación de energía cinética turbulenta ε:

$$\frac{\partial [\rho \varepsilon]}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \bar{u}_j \varepsilon - r^{(\varepsilon)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \rho [C_{\varepsilon 1} P^{(k)} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon] \frac{\varepsilon}{k} \quad (4)$$

Donde las difusividades son descritas por:

$$r^{(k)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (5)$$

$$r^{(\varepsilon)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (6)$$

La viscosidad turbulenta μ_t se determina a partir de los valores de la energía cinética turbulenta, la producción de energía cinética está dada por $P^{(k)}$ y la disipación de la energía cinética turbulenta de la siguiente forma:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Considerando flujo incompresible y unidireccional, sin gradientes de presión y esfuerzo cortante constante, los perfiles que describen el comportamiento de una capa límite atmosférica utilizando el modelo k-ε estándar son:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (8)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_{\mu ABL}}} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa(z + z_0)} \quad (10)$$

Estos perfiles son utilizados como condición frontera en estudios aerodinámicos en CFD (flujo de entrada). Debido a que se está utilizando el modelo k-ε, la suposición de flujo isotrópico es aplicada, por lo que la intensidad turbulenta se calcula mediante:

$$I_u = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{u} \quad (11)$$

La cantidad C_μ se calcula a partir de los valores de la velocidad de fricción del viento y la energía cinética turbulenta, con la ecuación (12). El número de disipación turbulenta de Prantl se obtiene a partir de la ecuación (13).

$$C_{\mu ABL} = \frac{u^{*4}}{k^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{\varepsilon ABL} = \frac{\kappa^2}{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}) \sqrt{C_{\mu ABL}}} \quad (13)$$

Para describir el comportamiento del viento cercano a superficies lisas, se hace uso de funciones de pared estándar. La velocidad adimensional se describe mediante la ecuación (14), donde κ es la constante de Von Kármán y el valor típico para la constante adimensional es $E \approx 9.79$.

$$U_{smooth}^* = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^*) \quad (14)$$

La distancia adimensional desde la pared se define mediante la ecuación (15), el valor para C_μ en esta zona es el valor estándar del modelo k-ε, esto es: $C_{\mu std} = 0.09$.

$$y^* \equiv \frac{\rho C_{\mu std}^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (15)$$

Para superficies rugosas, Parente y Benocci (2010) propusieron simular implícitamente la rugosidad del suelo del dominio computacional mediante la ecuación (16), donde se utilizaron de funciones de pared del tipo z_0 .

$$\frac{u}{u_{rough}^*} = \frac{1}{\kappa} \ln(E_{ABL} z_{ABL}^*) \quad (16)$$

Como se puede observar, es un análogo a las funciones de pared estándar, sin embargo, en este caso el valor de la constante E es sustituido por E_{ABL} y se calcula mediante la ecuación (17). La altura adimensional se define mediante la ecuación (18) y corresponde con $(z_p + z_0)/E_{ABL}$.

$$E_{ABL} = \frac{\mu}{\rho C_{\mu ABL}^{1/4} k_p^{1/2} z_0} \quad (17)$$

$$z_{ABL}^* = \frac{\rho C_{\mu ABL}^{1/4} k_p^{1/2}}{\mu} (z_p + z_0) \quad (18)$$

La ecuación de la energía cinética turbulenta en las superficies no es resuelta, en su lugar se impone la condición (19). El cálculo de la disipación turbulenta se realiza mediante la ecuación (20).

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (19)$$

$$\varepsilon_p = \frac{C_{\mu}^{3/4} ABL k_p^{3/2}}{\kappa \gamma_p} \quad (20)$$

Adicionalmente se introdujo un factor de corrección (θ), definido en la ecuación (21), en la ecuación (15), para sustituir el valor $C_{\mu ABL}$ por $C_{\mu std}$ en las superficies aerodinámicamente lisas. Las cantidades utilizadas en este trabajo se muestran en la Tabla 1.

$$\theta = \left(\frac{C_{\mu std}}{C_{\mu ABL}} \right)^{1/4} \quad (21)$$

Tabla 1. C cantidades del modelo.

Cantidad	Valor
z_0	$3.5 \times 10^{-5} \text{ m}$
u^*	0.5838 m s^{-1}
k	$3.2713 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$
$C_{\mu std}$	0.09
$C_{\mu ABL}$	0.01086
κ	0.4187
c_{e2}	1.92
c_{e1}	1.44
$\sigma_{e std}$	1.3
$\sigma_{e ABL}$	3.5054
σ_k	1
μ	$1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
ρ	1.225 kg m^{-3}
γ	2

Por otro lado, cuando se considera el heliostato en el dominio de estudio, se produce una perturbación en el flujo, por lo tanto, las ecuaciones (12) y (13) solo son válidas a la entrada del dominio computacional. Basados en los estudios de Parente *et al.* (2011), se variaron C_{μ} y σ_{ε} mediante las ecuaciones (22) y (23) desde sus valores estándar ($C_{\mu std}$ y $\sigma_{e std}$) del modelo k- ε en las zonas donde el flujo impacta al heliostato hasta los valores $C_{\mu ABL}$ y $\sigma_{e ABL}$ en las zonas de flujo libre.

$$\delta = \min \left(\left| \frac{|\mathbf{u}| - u_{log,ABL}}{u_{log,ABL}} \right|, 1 \right) \quad (22)$$

$$\phi_{local} = \phi_{std} + (1 - \delta^{\gamma})(\phi_{ABL} - \phi_{std}) \quad (23)$$

La ecuación (22) calcula la diferencia entre la velocidad local respecto a los valores de entrada en un flujo que impacta con un obstáculo, mientras que con la ecuación (23) se calculan los valores locales de C_{μ} y σ_{ε} . La forma de esta transición está dada por γ .

Como consecuencia de los cambios anteriores, la definición de la viscosidad turbulenta debe de ser modificada, de la siguiente manera:

$$\mu_t = \rho C_{\mu local} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (24)$$

A las fuerzas y momentos generados por la interacción del viento y los heliostatos se les llama cargas aerodinámicas. En el presente estudio se utilizó el sistema coordenado definido por Peterka *et al.* (1986) como se muestra en la Figura 1. La distancia focal (d_{focal}) y curvatura de los heliostatos concentradores con canteo esférico se muestran en la Figura 2. Entre más pequeña la distancia focal, mayor es su curvatura.

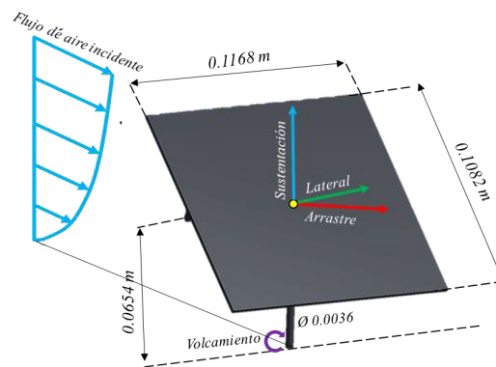


Figura 1. Sistema coordenado, dimensiones del heliostato y coeficientes aerodinámicos.

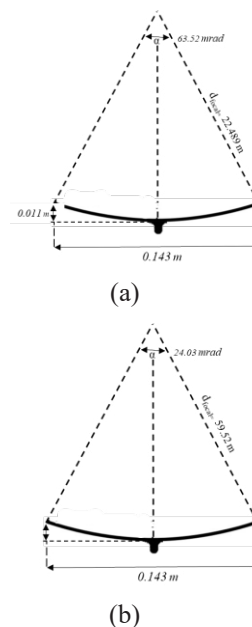


Figura 2. Sección transversal de los heliostatos concentradores.
(a) $d_{focal}=22.489 \text{ m}$ y (b) 59.52 m .

En forma matemática los coeficientes aerodinámicos se determinaron de la siguiente manera:

$$C_{arraastre,sustentación} = \frac{F_{arraastre,sustentación}}{\frac{1}{2}\rho A_{ref}u_{ref}^2} \quad (25)$$

$$C_{volcamiento} = \frac{M_{volcamiento}}{\frac{1}{2}\rho A_{ref}L_{ref}u_{ref}^2} \quad (26)$$

3. METODOLOGÍA COMPUTACIONAL

Como primer requerimiento para desarrollar un estudio de cargas aerodinámicas, es necesario asegurar que los perfiles de velocidad e intensidad turbulenta no se deformen conforme avanzan por el dominio computacional (homogeneidad horizontal del flujo), por lo tanto, el presente estudio se dividió en dos etapas. En la primera etapa se analizó únicamente el flujo de una capa límite atmosférica en un dominio vacío, mientras que, en la segunda, se introdujo en el sistema un heliostato a escala (1:10) y se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software ANSYS Fluent de doble precisión, basando en la presión y estado transitorio. En ambos casos se utilizó el modelo k-ε estándar y la corrección Kato-Launder. A la entrada del dominio computacional (Figura 3) se impusieron los perfiles (8-10). En la parte superior, se utilizó la condición de simetría. En la parte inferior se utilizaron funciones de pared rugosa del tipo z_0 . En la superficie del heliostato se utilizaron funciones de pared estándar y se aplicó la condición de flujo de salida en la salida del dominio.

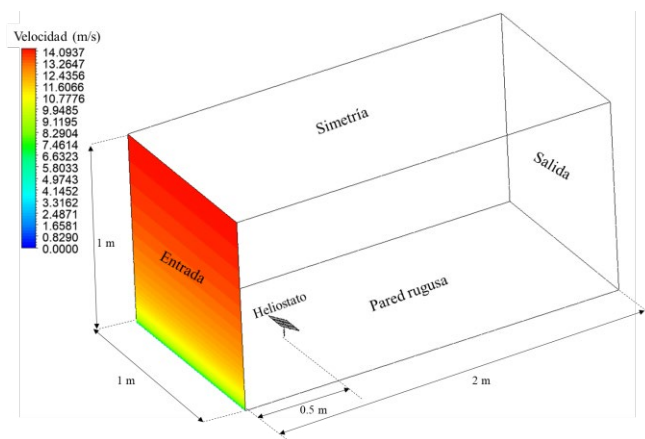


Figura 3. Dominio computacional.

El modelo matemático se resolvió utilizando el algoritmo SIMPLE para el acoplamiento presión-velocidad. El esquema de discretización estándar fue utilizado para la presión y discretización de segundo orden aguas arriba (contracorriente) fue utilizado para las ecuaciones de momentum y cantidades turbulentas. Se utilizaron cuatro pasos de tiempo distintos (0.1 s, 0.15 s, 0.20 s y 0.25 s) y se probaron cuatro mallas computacionales (801846, 981585, 1212897 y 1460013 celdas), con diferencias menores al 1 % entre los coeficientes

aerodinámicos. Las simulaciones se llevaron a cabo hasta que se alcanzaba el estado estacionario. Como criterio de convergencia, se consideró un residual global menor a 1×10^{-6} para todas las ecuaciones de transporte.

En la primera etapa se realizó un mallado computacional conformados por hexaedros regulares estrechados verticalmente hacia la parte inferior del dominio, mientras que en la segunda etapa se utilizó un mallado híbrido conformado por poliedros en los bordes del sistema y en la superficie del heliostato con una transición gradual a hexaedros a las regiones de flujo libre.

Cuatro configuraciones de mallado distintas fueron usadas para comprobar la independencia de malla, en cada una de ellas, se utilizó refinamiento por proximidad a bordes, capas límites en la parte inferior del sistema, así como en la superficie del heliostato y se modificaron aspectos como el tamaño de los elementos en la superficie del heliostato y el volumen de las celdas del sistema de acuerdo con los parámetros de mallado de superficie. Los valores de referencia utilizados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de referencia

Cantidad	Valor
z_{ref}	0.167 m
u_{ref}	11.8108 m s ⁻¹
A_{ref}	0.0126 m ²
L_{ref}	0.1082 m
B_{ref}	0.1168 m

4. RESULTADOS

En la Figura 4 se presentan los perfiles de velocidad e intensidad turbulenta en la dirección del flujo, obtenidos en el dominio computacional vacío. Se compararon los perfiles a la entrada e incidentes sobre el heliostato. La diferencia porcentual promedio para la velocidad fue de 0.22% mientras que para la intensidad turbulenta fue de 0.43%. En la Figura 5 se muestran los perfiles de velocidad a intensidad turbulenta en dirección perpendicular al flujo. Como se puede apreciar la velocidad y la turbulencia se mantienen prácticamente constantes desde la entrada hasta la zona de incidencia.

La validación de la metodología computacional se llevó a cabo comparando los coeficientes aerodinámicos obtenidos en este estudio y los experimentalmente reportados en la literatura (Peterka et al. (1986)). En la Tabla 3, se muestran los resultados teóricos y experimentales. El error promedio para el coeficiente de arrastre fue de 4.2% para los casos analizados, para la sustentación fue de 6.2% y para el volcamiento 5.7%. La aproximación se consideró adecuada para considerar como validez la metodología computacional.

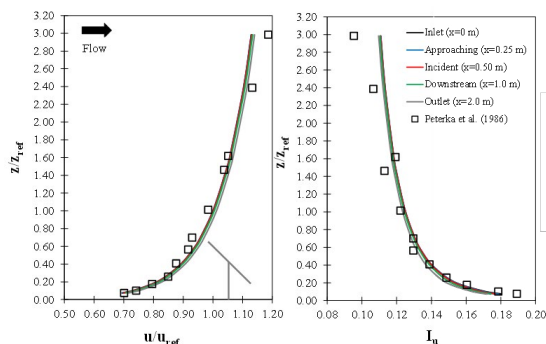


Figura 4. Perfiles de velocidad (izquierda) e intensidad turbulenta (derecha) en dirección del flujo.

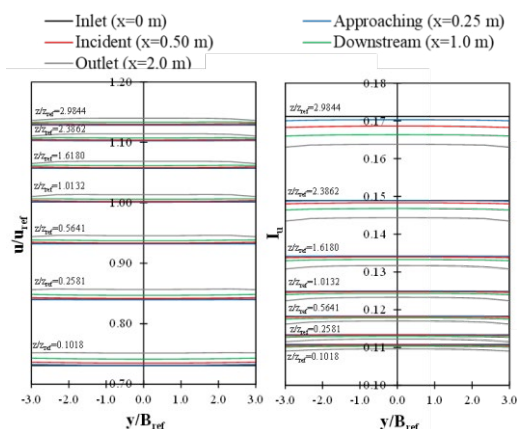


Figura 5. Perfiles de velocidad (izquierda) y perfiles de intensidad turbulenta (derecha) perpendiculares al flujo.

Tabla 3. Comparación de los coeficientes aerodinámicos del presente estudio y los reportados por Peterka et al. (1986).

α (°)	Presente estudio			Peterka et al. (1986)		
	C_a	C_s	C_v	C_a	C_s	C_v
0	1.175	0.008	0.746	1.17	-	0.83
15	1.139	0.288	0.760	1.10	0.26	0.77
30	0.996	0.548	0.706	0.94	0.59	0.67
45	0.759	0.698	0.578	0.71	0.68	0.59
60	0.478	0.689	0.405	0.50	0.79	0.47
75	0.228	0.501	0.264	-	0.43	0.25
80	0.152	0.333	0.186	0.13	0.29	-
84	0.108	0.196	0.092	0.128	-	0.10

En la Tabla 4, se muestra la comparación de los coeficientes aerodinámicos para los heliostatos con distancias focales diferentes. Como se puede apreciar, debido a que el flujo de aire está llegando por la parte de atrás del heliostato, los coeficientes de arrastre son menores para el heliostato con mayor curvatura (menor distancia focal). Sin embargo, los coeficientes de sustentación y volcamiento, pasa lo contrario. Los valores son

ligeramente mayores para el heliostato con una mayor distancia focal (menor curvatura).

Tabla 4. Coeficientes aerodinámicos de dos heliostatos concentradores con dos diferentes distancias focales.

α (°)	$d_{focal}=59.52$ m			$d_{focal}=22.49$ m		
	C_a	C_s	C_v	C_a	C_s	C_v
0	1.151	0.008	0.951	1.103	0.032	0.922
15	1.124	0.277	0.984	1.078	0.276	0.956
30	0.949	0.506	0.904	0.912	0.506	0.886
45	0.642	0.559	0.705	0.606	0.573	0.693
60	0.347	0.430	0.466	0.288	0.452	0.439
75	0.168	0.254	0.256	0.091	0.262	0.501
80	0.124	0.153	0.187	0.048	0.172	0.144
84	0.099	0.066	0.136	0.024	0.085	0.094

En la Figura 6 se muestra el patrón de flujo para el heliostato con $d_{focal}=22.49$ m, para (a) $\alpha=30^\circ$ y (b) $\alpha=60^\circ$. Para $\alpha=30^\circ$, se aprecia un remolino, en la parte inferior del heliostato que se forma corriente arriba, al separarse el flujo entre una masa de aire que lo rodea por la parte superior y otra por la parte inferior. Cuando $\alpha=60^\circ$, el remolino corriente arriba desaparece.

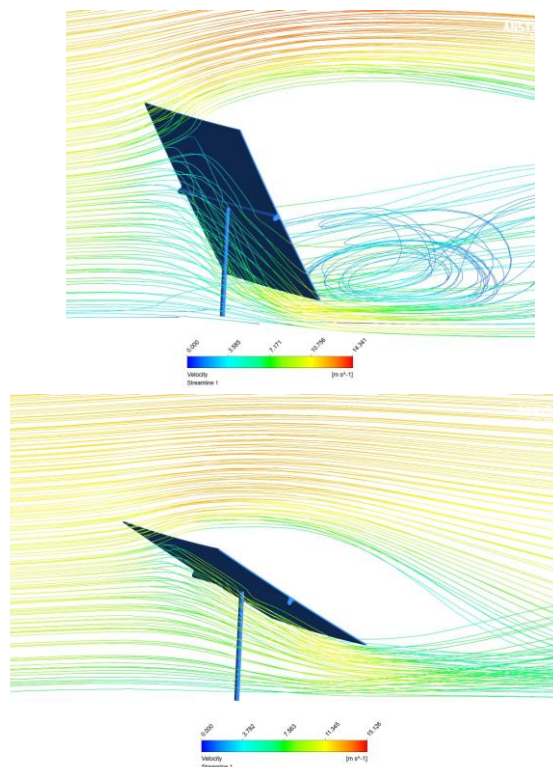


Figura 6. Patrón de flujo sobre el heliostato con $d_{focal}=22.49$ m. (arriba) $\alpha=30^\circ$ y (abajo) $\alpha=60^\circ$.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un estudio computacional sobre las cargas generadas en heliostatos concentradores, debido a un flujo de capa límite atmosférica utilizando un modelo de turbulencia k- ϵ modificado. La metodología computacional se validó comparando con datos experimentales reportados en la literatura.

Basados en los resultados, concluimos lo siguiente:

1. Los perfiles de velocidad e intensidad turbulenta alcanzaron buena homogeneidad horizontal mediante la implementación de funciones de pared modificadas para superficies rugosas.
2. Se encontró una buena concordancia entre los coeficientes aerodinámicos obtenidos en este estudio y los experimentales reportados en la literatura.
3. Cuando el flujo de aire choca en la parte de atrás del heliostato, al aumentar la curvatura se logra una reducción en los coeficientes de arrastre. Sin embargo, se presenta un incremento en los coeficientes de sustentación y volcamiento.
4. El ángulo de elevación (α) modifica sustancialmente el patrón de flujo corriente del heliostato. Lo anterior ocasiona una variación en los coeficientes aerodinámicos. El coeficiente de arrastre se reduce con α , mientras que el coeficiente de sustentación tiene un máximo en $\alpha=45^\circ$.

6. REFERENCIAS

Durán, R.L., Hinojosa, J.F., Sosa-Flores, P., 2022. A novel approach for computational fluid dynamics analysis of mean wind loads on heliostats, *Journal of Solar Energy Engineering*, 144(6), 061008-1.

Emes, M. J., Jafari, A., Ghanadi F., Arjomandi, M., 2019. Hinge and overturning moments due to unsteady heliostat pressure distributions in a turbulent atmospheric boundary layer. *Solar Energy* 193, 604-617.

Emes, M. J., Arjomandi, M., Graham, J. Nathan, 2015. Effect of heliostat design wind speed on the levelized cost of electricity from concentrating solar thermal power plants. *Solar Energy* 115, 441-451.

IRENA, 2010. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Concentrating Solar Power, Volume 1: Power Sector Issue 2/5. International Renewable Energy Agency.

IRENA, 2021. Trends in Renewable Energy. <http://www.irena.org/Statistics>.

Mammar, M., Djouimaa, S., Gärtner, U., Hamidat, A., 2018. Wind loads on heliostats of various column heights: An experimental study. *Energy* 143, 867-880.

Marais, M.D., Craig, K.J., Meyer, J.P., 2015. Computational Flow optimization of heliostat aspect ratio for wind direction and elevation angle. *Energy Procedia*, 69, 148-157.

Parente, A., Benocci, C., 2010, May. On the RANS simulation of neutral ABL flows. Paper presented at the Fifth International Symposium of Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA.

Parente, A., Gorlé, C., Van Beeck, J., Benocci, C., 2011b. A Comprehensive Modelling Approach for the Neutral Atmospheric Boundary Layer: Consistent Inflow Conditions, Wall function and Turbulence Model. *Boundary Layer Meteorology*, 140, 411-428.

Peterka, J.A., Hosoya, N., Bienkiewicz, B., Cermak, J.E., 1986. Wind Load Reduction for Heliostats, SERI/STR-253-2859 DE86010703. Solar Energy Research Institute.

Peterka, J.A., Tan, Z., Cermak, J.E., Bienkiewicz, B., 1989. Mean and peak wind loads on heliostats. *ASME J. Sol. Energy Eng.*, 111(2), 158-164.

Pfahl, A., Uhlemann, H., 2011. Wind loads on heliostats and photovoltaic trackers at various Reynolds numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99, 964-968.

Poulain, P.E., Craig, K.J., Meyer, J.P., 2016, May. Influence of the gap size on the wind loading on heliostats. *AIP Conference Proceedings* 1734, 020019.

Sosa-Flores, P., Hinojosa, J.F., Duran, R., 2022. Computational fluid dynamics study of the rear geometry influence on aerodynamic load coefficients of heliostats in stow position, *Solar Energy* 241, 130-156.

Yadav, D., Banerjee, R., 2016. A review of solar thermochemical processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 497-532.

Wu, Z., Gong, B., Wang, Z., Li, Z., Zang, C., 2010. An experimental and numerical study of the gap effect on wind load on heliostat. *Renewable energy* 35, 797-806.

Evaluación numérica de la absorción de energía de perfiles de base cuadrada bajo cargas de flexión

Quirino Estrada*, Dariusz Szwedowicz**, Elva Reynoso*, Jesús Silva Aceves*, Lara Wiebe*, Juan Misael Martínez*

*Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Ciudad Juárez, Chihuahua México (quirino.estrada@uacj.mx, elva.reynoso@uacj.mx, jesilva@uacj.mx, lara.wiebe@uacj.mx, al183089@alumnos.uacj.mx)

**Departamento de Ingeniería Mecánica, TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (dariusz.sd@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: Los choques laterales representan una de las principales causas de decesos en pasajeros debido a la falla prematura por flexión de componentes estructurales. A partir de lo anterior el presente artículo evalúa la capacidad de absorción de energía de perfiles con base cuadrada a través de un ensayo de flexión de tres puntos. Durante el estudio se evaluaron siete configuraciones de perfiles cuadrangulares fabricados con aluminio 6063-T5 utilizando el software Abaqus. Para cada estructura se calcularon los principales indicadores de resistencia al impacto y se compraron con los obtenidos para un perfil cuadrado típico. Los resultados indicaron un aumento de la absorción de energía de los perfiles reforzados hasta en un 22.15%. Sin embargo, la mejor eficiencia de la fuerza de aplastamiento se calculó para la estructura CC con un valor de CFE de 0.76.

Keywords: Estructuras tubulares, sección cuadrada, método de elemento finito, flexión tres puntos.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño estructural de los componentes automotrices y en general del chasis es de suma importancia desde que deben brindar rigidez, así como proteger a los ocupantes durante colisiones (Wang, D. et al., 2022). En este sentido es necesario absorber la mayor cantidad a través de la deformación plástica controlada (Ferdynus, M. et al., 2020). Por consiguiente, se han realizado esfuerzos para aumentar la eficiencia de la absorción de energía de perfiles estructurales sujetos a cargas axiales (Rogala, M. et al., 2021), flexionantes (Huang, Z. et al., 2020), (Zhang, X. et al., 2016), oblicuas (Tran, T. 2020), entre otras. Para el caso especial de perfiles a flexión, su estudio se ha incrementado desde que múltiples componentes automotrices tales como pilares B, barras de seguridad en puertas y estribos son sometidos a este tipo de cargas (Ghadianlou, A. et al., 2013). Li, Z. et al. (2021) evaluó el colapso a flexión de tubos de pared delgada rectangulares y su aplicación en el diseño estructural de automóviles. Durante el estudio los perfiles rectangulares propuestos se evaluaron experimental, teórica y numéricamente. Adicionalmente a través de un proceso de optimización se concluyó la efectividad de los perfiles propuestos para el diseño automotriz. Por su parte Xie, Z. (2020) compararon la resistencia a la flexión de perfiles cuadrados con diferentes refuerzos internos. Como conclusión se incrementó la capacidad de flexión de todos los perfiles respecto a un perfil cuadrado típico. En otro trabajo Estrada, Q. et al. (2022) evaluaron el efecto de platos de reforzamiento en perfiles, así como el efecto de la relación de aspecto. El mejor desempeño de CFE se obtuvo al aplicar refuerzo horizontal a un perfil elíptico. Estrada, Q. et al. (2021)

evaluaron el efecto de las restricciones de sujeción de los extremos de perfiles cuadrados. Los resultados mostraron un impacto directo del modo de empotramiento, fuerza de ensamble y longitud de las almohadillas de sujeción en la absorción de energía. El mejor desempeño de CFE (0.78) se obtuvo al colocar almohadillas externas en los extremos del perfil. Por su parte Fu, X. et al. (2022) evaluaron el colapso a flexión de tubos arqueados. La evaluación de los perfiles se realizó a través de una prueba de flexión de tres puntos. Como resultado se determinó la efectividad de los tubos arqueados al incrementar hasta cinco veces la absorción de energía respecto a un tubo recto. Tal y como se ha demostrado, el estudio de perfiles estructurales a flexión se ha incrementado. Sin embargo, los estudios relacionados a este tipo de cargas son menores respecto al análisis axial. Por tanto, el presente artículo evalúa el efecto del reforzamiento de perfiles cuadrados de forma numérica utilizando el software Abaqus. Para tal objetivo diversas configuraciones de refuerzos fueron propuestas y evaluadas a través de un ensayo de flexión de prueba de tres puntos.

2. INDICADORES DE RESISTENCIA AL IMPACTO

La evaluación de los perfiles estructurales se realizó a través del estudio de las curvas fuerza vs desplazamiento a partir de las cuales se obtuvieron los indicadores de resistencia al impacto tales como: carga pico (Pmax), absorción de energía (Ea), fuerza promedio (Pm), absorción de la energía específica (SEA) y eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE). Un valor de CFE es óptimo cuando es igual a 1 (Tang, T. et al 2016). Detalles de los indicadores se muestran en la Figura 1.

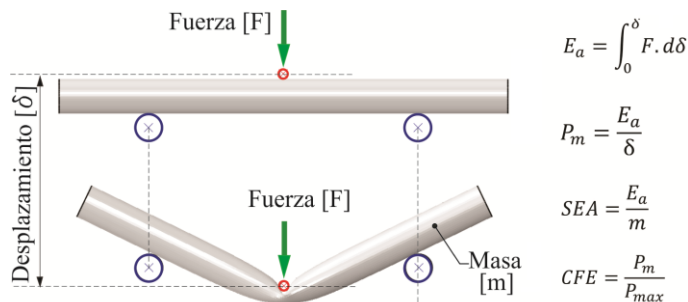


Fig. 1. Indicadores de absorción de energía y nomenclatura, donde F es la fuerza y δ el desplazamiento.

3. MODELO DISCRETO DE UNA PRUEBA DE FLEXIÓN DE TRES PUNTOS: VALIDACIÓN

La exactitud de los resultados numéricos del presente artículo debe de garantizarse. Por tanto, se desarrolló un primer modelo discreto de una prueba de flexión de tres puntos y se validó experimentalmente. El modelo consta de un perfil cuadrado de 38.3 mm x 38.3 mm de lado, una longitud de 400 mm y un espesor de 1.4 mm. El perfil cuadrado se modeló con elementos S4R con propiedades elastoplásticas para aluminio 6063-T5 definidas con módulo de Young de 66.94 MPa, coeficiente de Poisson de 0.33, densidad de 2700 kg/m³ y esfuerzo de fluencia se 158.79 MPa (Vergara, J. et al., 2019). Los elementos del banco de flexión, soportes y punzón se modelaron con elementos rígidos R3D4. Las condiciones de contacto se modelaron con un coeficiente de fricción de 0.3. Con el objeto de optimizar y en congruencia con el análisis de convergencia de malla se obtuvo un tamaño de elemento de 5 y 2.5 mm para la región central. Detalles del modelo discreto se muestran en la Figura 2.

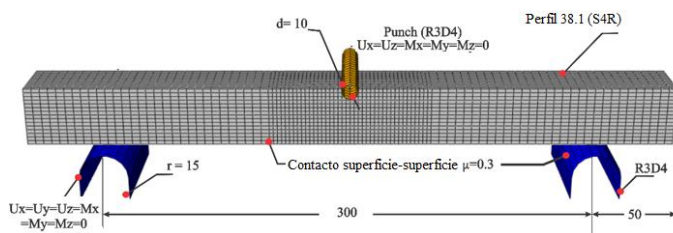


Fig. 2. Modelo discreto: ensayo de flexión de tres puntos.

Los resultados experimentales y numéricos se muestran en las Figuras 3 y 4 para la fuerza curva vs desplazamiento y el modo de colapso a flexión, respectivamente. La Figura 3, muestra en ambos modelos un aumento súbito de la fuerza hasta alcanzar un valor cercano a 5.7 kN, posteriormente un decaimiento suave hasta estabilizarse en un valor de 3 kN. Por su parte la congruencia en el modo de deformación entre modelos se observa en la Figura 4.

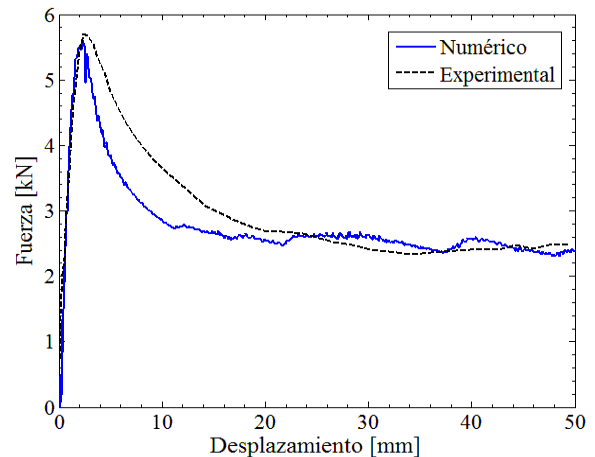


Fig. 3. Fuerza de flexión vs desplazamiento.

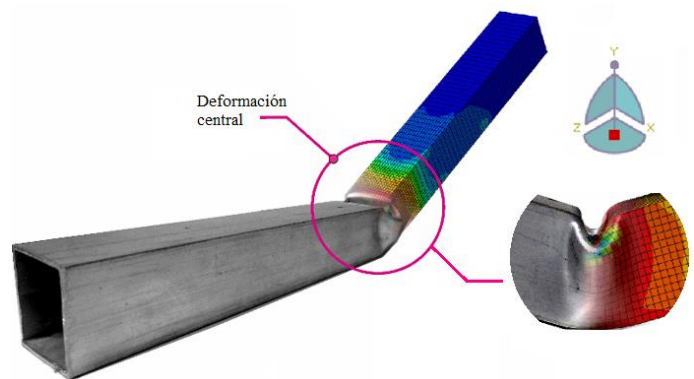


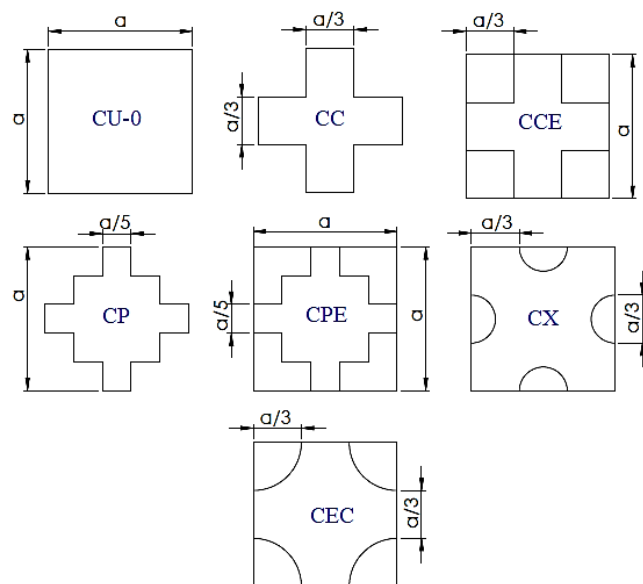
Fig. 4. Comparación del modo de colapso a flexión.

La validación del modelo discreto se corroboró desde que se calculó una diferencia menor del 5% entre ambos modelos para la carga pico y fuerza promedio. Por tanto, es posible continuar con el análisis paramétrico solo en forma computacional de los perfiles cuadrados con refuerzo.

4. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE PERFILES DE BASE CUADRADA CON REFUERZOS

El presente artículo plantea reforzar perfiles estructurales cuadrados con el objeto de incrementar la eficiencia en la absorción de energía. Para tal objetivo se presentan siete estructuras con diferentes configuraciones de reforzamiento incluyendo un perfil cuadrado típico (CU-0). Los perfiles se evaluaron a través de un ensayo de flexión de tres puntos a 2 mm/min. La prueba se realizó con un desplazamiento final de 80 mm. En todos los casos los perfiles fueron fabricados con aluminio 6063-T5 y presentan una misma masa igual a 0.288 gr y longitud de 400 mm. Por tanto, ajustes en los espesores de estos fueron considerados. Un resumen de las características de los perfiles evaluados se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructuras evaluadas, donde a igual a 38.3 mm



Código	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Masa (kg)
CU-0	1.40	400	0.288
CC	1.40	400	0.288
CCE	0.83	400	0.288
CP	1.40	400	0.288
CPE	0.77	400	0.288
CX	0.92	400	0.288
CEC	0.92	400	0.288

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS REFORZADAS

La Figura 5 presenta el comportamiento de la fuerza de flexión. Adicionalmente se presenta los resultados para un perfil simple cuadrado (CU-0). En todos los casos se presenta similitud en la forma de la curva. Sin embargo, en algunos casos se observó una forma exponencial suave de la fuerza, especialmente para los perfiles CC y CP. Los valores de P_{max} están dentro del rango de 5.8 a 3.2 kN.

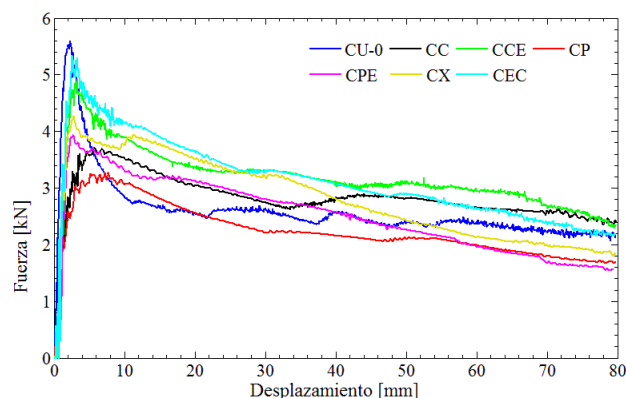


Fig. 5. Comparación de curvas esfuerzo-deformación.

A partir de la integración del área bajo la curva fuerza-desplazamiento se calculó la energía absorbida (E_a) por deformación plástica de los perfiles. La Figura 6 muestra la comparación de E_a obtenido. Descartando el valor de E_a para los perfiles con base de cruz fractal (CP y CPE) todos los perfiles exhibieron un aumento de E_a respecto a un perfil simple (CU-0). Los valores de energía absorbida están comprendidos entre 175 J a 250 J aproximadamente.

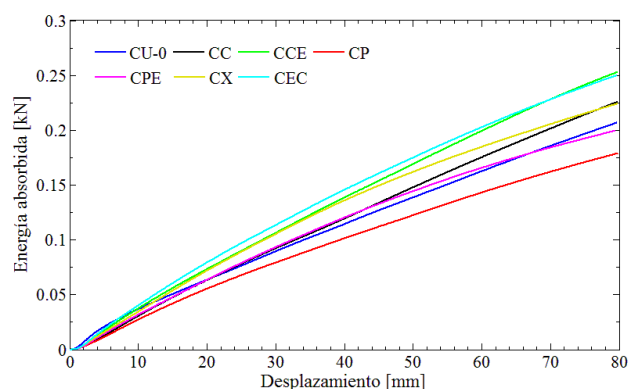


Fig. 6. Energía absorbida por perfiles estructurales.

Tal y como se ha indicado la absorción de energía se obtiene por la deformación plástica de las estructuras. En este sentido los refuerzos definieron la forma de colapso de los perfiles. Las Figuras 7 y 8 muestran el modo de deformación el cual es principalmente caracterizado por la formación de una indentación central con lóbulos exteriores. Para los casos de perfiles no delimitados por un cuadrado (CX y CP), la deformación de lóbulos exteriores aumentó.

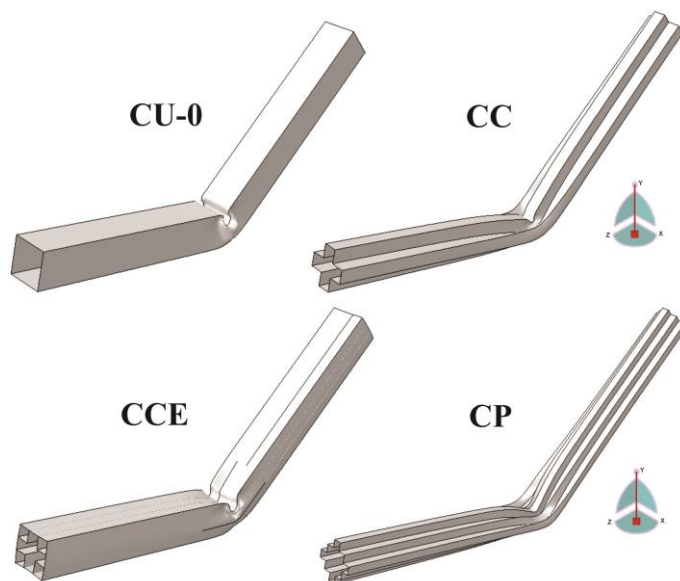


Fig. 7. Modo de colapso final de perfiles evaluados I.

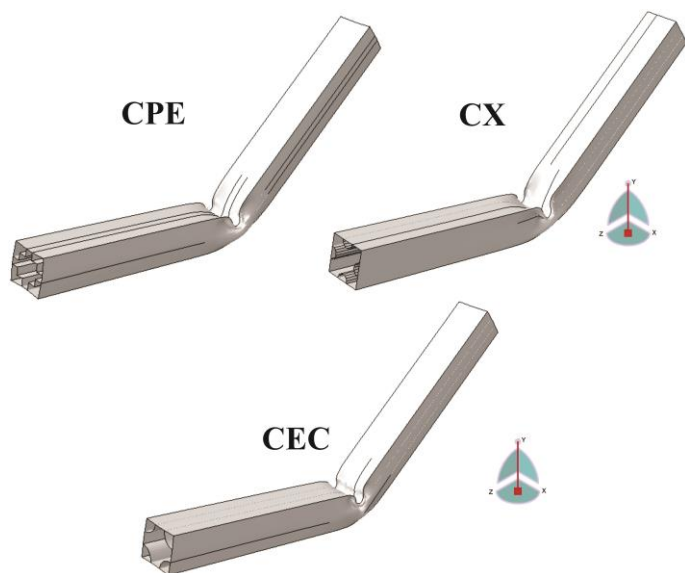


Fig. 8. Modo de colapso final de perfiles evaluados II.

La cuantificación del desempeño mecánico de los perfiles estructurales se realizó a través del cálculo de los indicadores de resistencia al impacto (ver Fig. 1). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2. En todos los casos los resultados presentados son comparados para un perfil sin refuerzo (CU-0). La máxima resistencia a la flexión se obtuvo con el perfil reforzado con semicírculos en las esquinas (CEC) con 5.35 kN y la menor fue para el perfil fractal (CP) con 3.26 kN. Considerando la fuerza promedio (P_m) el mejor desempeño se calculó para la estructura en forma de cruz (CCE) con un valor de 3.16 kN. Respecto a la absorción de energía (E_a) y sin considerar los perfiles CP y CPE las estructuras reforzadas mejoraron la E_a en un rango de entre 8.28-22.15%. Físicamente esto demuestra una mayor deformación plástica. La mayor E_a se obtuvo para el perfil en forma de cruz encapsulado en un cuadrado (CCE) con 252.89 J. Este valor fue confirmado al calcularse también para este perfil la mayor absorción de energía específica (SEA) con 0.878 J/gr.

Tabla 2. Resultados para perfiles evaluados

Código	P _{max} (kN)	P _m (kN)	E _a (J)	SEA (J/gr)	CFE
CU-0	5.63	2.58	207.02	0.718	0.458
CC	3.72	2.82	225.83	0.784	0.760
CCE	4.91	3.16	252.89	0.878	0.643
CP	3.26	2.23	178.97	0.621	0.684
CPE	3.93	2.49	199.43	0.692	0.633
CX	4.27	2.80	224.18	0.778	0.655
CEC	5.35	3.09	247.50	0.859	0.577

El parámetro de eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) representa uno de los más importantes indicadores de resistencia al impacto. En este sentido la CFE relaciona la carga pico con la fuerza promedio. El valor óptimo esperado es igual a 1 lo cual

indicaría que la fuerza pico se mantendría a lo largo del proceso de flexión sin decaer. En este sentido todas la estructuradas evaluadas presentaron una mejora en el valor de CFE respecto al perfil típico CU-0 en un rango de 25.98-65.93%. El valor más bajo de CFE igual a 0.577 se calculó para la estructura reforzada con semicírculos en las esquinas (CEC). El mejor desempeño se obtuvo con la estructura con refuerzo en forma de cruz CC con un valor de CFE igual a 0.76. Tal valor indica una menor diferencia entre los valores de P_{max} y P_m . Físicamente la estructura absorbe gran cantidad de energía y al momento del impacto se reduce considerablemente la aceleración. Por tanto, la geometría en forma de cruz sin cuadrado exterior (CC) se recomienda para su implementación en el diseño de componentes automotrices sujetos a cargas de flexión como por ejemplos barra de seguridad en puertas.

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se diseñó y evaluó numéricamente a través de una prueba de flexión de tres puntos siete perfiles de base cuadrada con diferentes configuraciones de reforzamiento. A partir del análisis numérico realizado se concluye lo siguiente:

1. Los refuerzos en el perfil cuadrado determinaron el modo de colapso de las estructuras. Por tanto, definen parámetros tales como resistencia a la flexión y energía absorbida.
2. Se obtuvo una mayor resistencia a la flexión cuando se refuerza el perfil cuadrado respecto a los perfiles fractales simples (CC y CP).
3. Respecto a la energía absorbida (E_a) y considerando que todas las estructuras presentan la misma masa (288gr), y a excepción de las estructuras fractales (CP y CPE), todas las estructuras con refuerzo presentaron un incremento en E_a y en la absorción de energía específica (SEA) de entre 8.28-22.15%.
4. Todas las estructuras propuestas presentaron un incremento de la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) respecto a una estructura cuadrada típica (CU-0). La mejora de CFE fue de entre 25.98-65.93%.
5. El mejor desempeño de CFE se calculó para el perfil en forma de cruz (CC) con un valor máximo de 0.76. Por tanto, tal geometría debería considerarse para el diseño de estructuras automotrices sujetas a flexión.
6. Los resultados obtenidos pueden ser válidos para análisis dinámicos si se considera la insensibilidad al endurecimiento por velocidad del aluminio 6063-T5.

REFERENCIAS

- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Tran, T., Rodriguez-Mendez, A., Elias-Espinosa, M., Gómez-Vargas, O. A., & Partida-Ochoa, G. (2022). Bending crashworthiness of elliptical

- tubes with different aspect ratio and stiffeners. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 120(9), 6661-6680.
- Estrada, Q., Vergara-Vázquez, J., Szwedowicz, D., Rodriguez-Mendez, A., Gómez-Vargas, O. A., Partida-Ochoa, G., & Ortiz-Domínguez, M. (2021). Effect of end-clamping constraints on bending crashworthiness of square profiles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116, 3115-3134.
- Ferdynus, M., Rozylo, P., & Rogala, M. (2020). Energy absorption capability of thin-walled prismatic aluminum tubes with spherical indentations. Materials, 13(19), 4304.
- Fu, X., Zhang, X., & Yu, Q. (2022). Bending collapse of optimal arched thin-walled structures. Thin-Walled Structures, 180, 109828.
- Ghadianlou, A., & Abdullah, S. B. (2013). Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts. Thin-Walled Structures, 67, 25-33.
- Huang, Z., & Zhang, X. (2020). Crashworthiness and optimization design of quadruple-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes under transverse bending. Composite Structures, 235, 111753.
- Li, Z., Tian, Y., Bai, J., & Zuo, W. (2021). Bending collapse of treble rectangular thin-walled tubes and its application in conceptual design for automobile crashworthiness. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 235(5), 1269-1284.
- Rogala, M., Ferdynus, M., Gawdzińska, K., & Kochmański, P. (2021). The Influence of Different Length Aluminum Foam Filling on Mechanical Behavior of a Square Thin-Walled Column. Materials, 14(13), 3630.
- Tang, T., Zhang, W., Yin, H., & Wang, H. (2016). Crushing analysis of thin-walled beams with various section geometries under lateral impact. Thin-Walled Structures, 102, 43-57.
- Tran, T. (2020). Study on the crashworthiness of windowed multi-cell square tubes under axial and oblique impact. Thin-Walled Structures, 155, 106907.
- Vergara, J. (2019). Disipación de energía por deformación plástica en estructuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas a flexión. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada
- Wang, D., Li, S., & Xie, C. (2022). Crashworthiness optimisation and lightweight for front-end safety parts of automobile body using a hybrid optimisation method. International Journal of crashworthiness, 27(4), 1193-1204.
- Xie, Z. (2020, July). A comparison of bending resistance of square thin-walled tubes with different internal reinforcements. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 892, No. 1, p. 012118). IOP Publishing.
- Zhang, X., Zhang, H., & Wang, Z. (2016). Bending collapse of square tubes with variable thickness. International Journal of Mechanical Sciences, 106, 107-116.

Análisis del efecto de la posición del material de cambio de fase (PCM) sobre el desempeño térmico de un sistema de calentamiento pasivo de muro Trombe

E. Vázquez-Beltrán*, Y. Olazo-Gómez*, V.M. Maytorena*, I. Hernández-López*

*Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000
(e-mail: a220230036@unison.mx)

Resumen:

Se presenta un estudio teórico del efecto de la posición del material de cambio de fase (PCM) sobre el desempeño térmico del sistema. Para ello, se analizaron las eficiencias térmicas del sistema tanto para el día ($\eta_{th,d}$) como para la noche ($\eta_{th,n}$), así como la eficiencia de absorción (η_{a-b}) y la eficiencia de descarga (η_d) bajo las condiciones climáticas del periodo más frío de todo un año bajo las condiciones climáticas de una ciudad con clasificación Köppen Cwa-Cwb de México. El sistema consiste en un muro de material homogéneo de concreto compuesto por una capa de PCM. Con el propósito de obtener la posición óptima del PCM, se realizó un análisis dinámico del sistema PCM-TW. Se planteó un modelo bajo el enfoque de balances globales de energía (BG) en 1D para resolver la transferencia de calor conjugada (conducción, convección y radiación superficial) en el sistema vidrio-canal mientras que, para resolver la difusión térmica en el muro con PCM se resolvió mediante el método de volumen finito (MVF). Los resultados mostraron que, para un muro de 11 y 15 cm con un PCM ubicado a 9 y 10 cm de profundidad con respecto a la superficie absorbidora presento el mejor desempeño térmico obteniendo eficiencias de $\eta_d = 62.9\%$ y 75.92% , respectivamente. Estando sólo por debajo un 10 y 8.39 % con respecto a un muro Trombe (TW) óptimo de 30 cm de espesor sin PCM de acuerdo con Hernández-López (2016).

Palabras clave: muro Trombe, material de cambio de fase, calefacción pasiva, evaluación dinámica.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de las edificaciones sigue siendo un importante consumidor de energía a nivel mundial, esto debido a los usos de calefacción, refrigeración, iluminación entre otros. La demanda energética en edificaciones representa alrededor del 30 % del consumo total de energía a nivel mundial presentando un incremento del 4 % respecto al 2020 (IEA,2022). Además, las emisiones de CO₂ relacionadas con el consumo de energía y la operación de los edificios representan el 38 % del total de las emisiones a nivel mundial.

Por lo tanto, estas cuestiones medioambientales son un factor determinante en la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan mitigar estos efectos adversos hacia el medio ambiente haciendo énfasis en el uso de la energía solar.

En particular una nueva tecnología que permita mantener un confort térmico y su vez reducir el consumo de energía, disminuyendo así su impacto ambiental. Es el sistema de muro Trombe (TW), es una tecnología solar pasiva de ganancia indirecta que se utiliza para calefacción y en algunas situaciones, para ventilación (Morse, 1881).

Utzinger et al. (1980) desarrollaron un modelo 1D basado en balances globales (GB) para analizar el flujo de calor no uniforme (2D) a través del TW. Concluyeron que un modelo

1D con una variación exponencial de la temperatura presenta una excelente concordancia en comparación con un modelo 2D.

Para optimizar el rendimiento del sistema de muro Trombe, algunos investigadores han propuesto la integración de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés). Estos materiales funcionan como un medio de almacenamiento de energía térmica al utilizar el calor latente que se produce durante el cambio de fase.

La incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en los TW mejora su rendimiento térmico al actuar como medio de almacenamiento de energía térmica y mantener una temperatura interior estable. Además, la integración de PCM puede mejorar la eficiencia energética y disminuir el consumo de energía en edificios (Qingang et al. 2022).

Rabani et al. (2013) investigó el uso de materiales PCM como alternativa para mejorar el rendimiento térmico de TW. Descubrieron que el uso de PCM en un muro puede aumentar su capacidad de almacenamiento térmico, lo que a su vez mantiene una temperatura más estable en la habitación sin necesidad de aumentar el espesor del muro.

Xiaoqin et al. (2019) realizaron estudios experimentales y numéricos en tres muestras de pared del TW con diferentes montajes. El ahorro energético promedio anual mediante el uso

de PCM fue del 17,7%, 20,2% y 30,1% cuando se colocó el PCM en la primera, segunda y tercera capa. Concluyeron, que, para las regiones más frías, es mejor colocar las esferas de PCM más cerca del lado de la habitación para obtener el mejor desempeño.

Duan et al. (2021) determinaron la combinación óptima de la temperatura de fusión del PCM y su espesor para tres diferentes ciudades de China. En concreto, se encontró que la combinación óptima era de 23 °C y 5 cm para Beijing y Jiuquan, y de 21 °C y 5 cm para Shenyang.

Aparicio (2021) realizó un estudio del efecto del punto de fusión de un PCM sobre el desempeño del sistema TW. El autor determinó que el mejor desempeño del sistema se obtiene al utilizar un PCM con punto de fusión de 29 °C mismo que es 1.25 veces mejor que el TW sin PCM para calentamiento exclusivamente nocturno. En la configuración propuesta por el autor se colocó el PCM entre dos losas de concreto.

Wei et al. (2023) realizaron un estudio de caso comparativo en diferentes ciudades y se encontró que el sistema de muro Trombe con un panel fotovoltaico (PV-TW) con la capa de PCM adherida a la superficie posterior del absorbente logró el mejor rendimiento eléctrico, pero el peor rendimiento pasivo de calefacción de espacios. El espesor de la capa PCM tuvo el mayor impacto en el rendimiento del sistema y se recomendó colocar la capa PCM más cerca del lado de la habitación en regiones más frías para obtener mejores beneficios integrales.

Si bien en la literatura existen estudios publicados sobre el desempeño térmico de sistemas PCM-TW, hasta la fecha no se han reportado estudios donde analice la ubicación del PCM para distintos espesores de muro y su respectiva comparación con un TW con un muro hecho de concreto (C-TW) para condiciones climáticas de México.

El objetivo de este trabajo es analizar como la ubicación del PCM afecta el rendimiento térmico del sistema PCM-TW con un muro de concreto para dos diferentes espesores. En particular, se explorarán cinco diferentes posiciones para el PCM. Además, se comparará con el desempeño C-TW con 30 cm de espesor. Esta comparación permitirá evaluar la eficiencia relativa del sistema PCM-TW en términos de sus eficiencias térmicas.

2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

En la Fig. 1 se presenta el modelo físico del sistema PCM-TW, el cual consiste en un termosifón de forma de tipo C, compuesto por una pared de vidrio expuesta al medio ambiente y un muro masivo. La mayor parte de la radiación solar atraviesa la pared de vidrio ($\tau_g^* G_{sol}$) la cual viaja a través del canal e incide sobre la superficie del absorbente siendo normalmente la superficie del muro pintada de negro ($\tau_g^* \alpha_{abs}^* G_{sol}$), siendo transformada en energía térmica, provocando un aumento en el calor sensible haciendo que una fracción se transmita por conducción a través del muro para ser

almacenada. Mientras que, el resto se transfiere por convección natural hacia el aire circundante contenido en el canal, detonando que el aire haciendo por cambio de densidades estableciendo un lazo convectivo mediante el canal y la habitación a través de las ventilas. Se consideró la orientación al sur para garantizar la mayor incidencia de radiación solar sobre el absorbente durante el día.

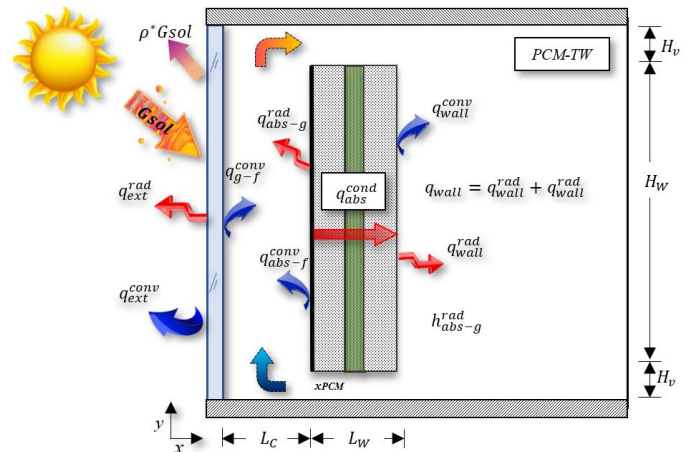


Fig. 1 Modelo físico del sistema PCM-TW.

Con la finalidad de reducir la complejidad del modelo matemático, el sistema se dividió en dos sistemas principales. El primer sistema vidrio-canal se resolvió mediante balances globales (BG). Mientras que, el segundo sistema muro-PCM se resolvió mediante el método de volumen finito (MVF).

2.1 Modelo de balances globales de energía en el sistema vidrio-canal

La Fig. 2 ilustra la ubicación de los puntos nodales para el sistema que incluye tres puntos en el vidrio, uno en el canal y uno en el absorbente, siendo este último nodo el que permite el acoplamiento del método de BG con el método MVF en el sistema muro-PCM.

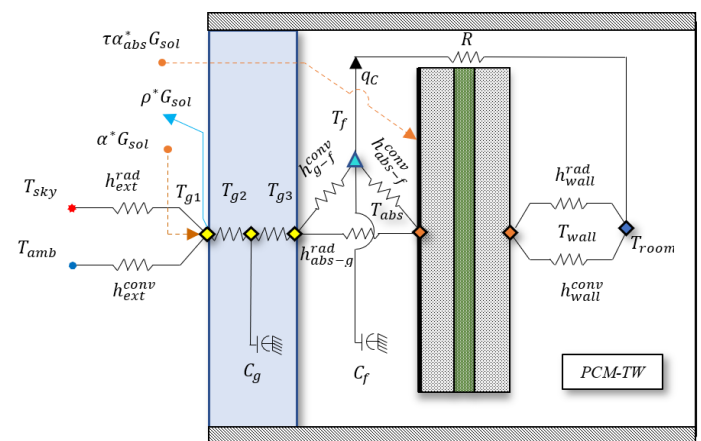


Fig. 2. Diagrama térmico resisitvo del sistema PCM-TW.

Los coeficientes convectivos y radiativos en el canal fueron determinados mediante correlaciones de Churchill y Chu (1975), fueron tomadas de Incropera y De Witt (2022).

El modelo matemático de transferencia de calor conjugada en el sistema vidrio-canal se encuentra descrito por las Ecs. (1)-(5):

$$\left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{12}} + h_{ext}^{conv}\right) T_{g,1} - \left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{12}}\right) T_{g,2} = h_{ext}^{conv} T_{amb} - \epsilon_g^* \sigma (T_{g,1}^4 - T_{sky}^4) + \alpha_g^* G_{sol} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{12}} + \frac{\lambda_g}{\delta x_{23}} + \frac{\rho_g C_{p,g} \Delta x_g}{\Delta t}\right) T_{g,2} - \left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{12}}\right) T_{g,1} - \left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{23}}\right) T_{g,3} = \frac{\rho_g C_{p,g} \Delta x_g T_{g,2}^0}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{12}} + h_{g-f}^{conv}\right) T_{g,3} - \left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{23}}\right) T_{g,2} - h_{g-f}^{conv} T_f = \epsilon_{g-abs}^* \sigma (T_{g,1}^4 - T_{sky}^4) \quad (3)$$

$$\left(h_{g-f}^{conv} + h_{abs-f}^{conv} + h_f + \frac{\rho_f C_{p,f} \Delta x_f}{\Delta t}\right) T_f - h_{g-f}^{conv} T_{g,3} - h_{abs-f}^{conv} T_{abs} = \frac{\rho_f C_{p,f} \Delta x_f T_f^0}{\Delta t} + h_f T_{room} \quad (4)$$

$$\left(h_{abs-f}^{conv}\right) T_{abs} - h_{abs-f}^{conv} T_f = \epsilon_{g-abs}^* \sigma (T_{abs}^4 - T_{g,3}^4) + \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} - q_{abs}^{cond} \quad (5)$$

Condición inicial: Se establece que, para cada punto nodal la temperatura parte de $T_{room}=24^\circ\text{C}$.

2.2 Modelo conductivo del muro almacenador

Se presenta el modelo matemático del sistema del muro almacenador con PCM.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Donde C es el calor específico efectivo ($C = C_p + h_{ls} / \Delta T_{ls}$) el cual representa la suma de las contribuciones de la energía sensible y la energía latente por unidad de masa y por unidad de temperatura Voller y Swaminathan (1991).

2.3 Eficiencias del sistema PCM-TW

Eficiencia térmica (η_{th}): Se puede expresar como la razón entre la energía térmica suministrada por el sistema TW y la radiación solar incidente sobre la superficie el TW (Dengjia et al. 2020).

$$\eta_{th} = \frac{Q_{gain}}{Q_{sol}} \quad (7)$$

Eficiencia de absorción (η_{a-s}): Esta eficiencia indica la habilidad del sistema TW para absorber y almacenar el calor proveniente de la radiación solar durante el día (Dengjia et al. 2020).

$$\eta_{a-s} = \frac{m_{wall} C_p \Delta T / t}{Q_{sol}} \quad (8)$$

Eficiencia de descarga (η_d): Cuantifica el tiempo en horas en el cual el sistema descarga la energía térmica absorbida durante el día hacia la habitación durante la noche (Dengjia et al. 2020).

$$\eta_d = \frac{t_d}{t_n} \quad (9)$$

3. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Para el algoritmo de solución se resolvió el problema de referencia propuesto por Aparicio (2021), el cual consiste en una losa de concreto unidimensional compuesta por un PCM (PureTemp29). El PCM tiene un espesor de 0.01 m, el cual se ubica entre dos secciones idénticas de concreto de 0.05 m de espesor. Con una condición frontera en $x = 0$ incide un flujo de calor $q_s = 750 \text{ W/m}^2$ y en la frontera $x = H_x$ se encuentra aislada. En la Tabla 1 se presenta la comparación de la energía almacenada en tres distintos instantes de tiempo, utilizando un enfoque BG y MVF.

Tabla 1. Energía almacenada (MJ).

t (h)	Aparicio (2021) ΔE_{sto}^{BG}	Presente trabajo ΔE_{sto}^{MVF}	ε (%)
1.0	2.70	2.70	0.00
2.0	5.40	5.41	0.18
3.0	8.10	8.12	0.24

Se observa que, la desviación máxima es de 0.24 % al tiempo de 3 h. Por lo tanto, la metodología empleada resuelve correctamente la difusión de calor en un sistema de losas con PCM. Se validó el modelo conductivo en una losa de concreto, utilizando datos experimentales de Chagolla-Aranda (2017).

En la Fig. 3 se muestra la comparación entre los datos experimentales de temperatura y los obtenidos mediante el código desarrollado. Se obtuvo una diferencia máxima de 1.9°C durante el segundo día de experimentación.

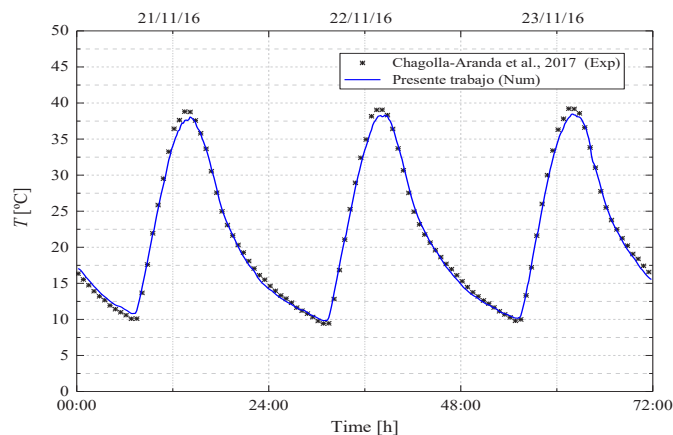


Fig. 3 Comparación de la Temperatura exterior de la losa de concreto con datos numéricos.

Los datos calculados presentaron una diferencia menor al 10% con respecto a las mediciones experimentales en más del 90% de los casos analizados. Como resultado, se puede afirmar que el modelo utilizado se ajusta de manera satisfactoria a los datos experimentales.

4. RESULTADOS

Se realizó un análisis dinámico de la optimización del desempeño térmico de un sistema solar pasivo PCM-TW mediante la ubicación óptima del PCM.

Para el análisis, se consideró el periodo más frío de todo un año bajo las condiciones climáticas de una ciudad con clasificación Köppen *Cwa-Cwb* de México. Correspondiente a los días 17, 18 y 19 de enero de la alcaldía de Tacubaya, CDMX.

De acuerdo con Hernández-López (2016), las dimensiones óptimas del sistema C-TW son: $H_v = L_c = 20$ cm; $L_w = 30$ cm, para una ciudad con clasificación Köppen *Cwb*, mismas que fueron tomadas para el presente estudio. Se analizaron tres casos: Caso 1: PCM-TW ($L_w = 11$ cm), Caso 2: PCM-TW ($L_w = 15$ cm) y Caso 3: C-TW ($L_w = 30$ cm). Para el Caso 1 y 2 se evaluó el PCM a diferentes posiciones: $x_{PCM} = 1, 3, 5, 7, 9 - 1, 4, 7, 10, 13$ cm, respectivamente. De acuerdo con, los resultados reportados por Aparicio (2021), se eligió el PCM PureTemp 29 (P-29).

En primera instancia se analizaron las eficiencias térmicas del sistema para cada uno de los casos, el resultado de los Casos 1 y 2 se comparó contra el Caso 3 siendo este el caso de referencia.

En la Tabla 2 se muestra como varía el rendimiento térmico del sistema PCM-TW al mover la posición del P-29 a través del muro. Los mejores resultados de $\eta_{th,d}$ se obtuvieron cuando el P-29 se ubica en $x_{PCM} = 1$ cm para los Casos 1 y 2, con valores de 24.62 % y 20.87 %, respectivamente. En comparación con el caso de referencia, el Caso 1 y 2 mejoran en un 59.55 % y 35.29 %.

Por el contrario, cuando se analiza la $\eta_{th,n}$, se observa que el mejor desempeño térmico se obtiene cuando el PCM se ubica en la parte posterior del muro. Para el Caso 1, se obtuvo una eficiencia de 3.75 % ($x_{PCM} = 9$ cm), mientras que para el Caso 2, se obtuvo una eficiencia de 5.58 % ($x_{PCM} = 10$ cm). Con respecto al Caso 3 se observa que, este tiene el mejor comportamiento de los casos anteriores al obtener una eficiencia de 6.20 %.

De manera similar, al analizar la η_{a-s} , se observa que, el sistema PCM-TW permite almacenar una mayor cantidad de energía térmica durante el día para su posterior liberación durante la noche. Para el Caso 1 se obtuvieron eficiencias del 27.38 % ($x_{PCM} = 9$ cm), mientras que, para el Caso 2 se obtuvieron eficiencias hasta de 30.26 % ($x_{PCM} = 10$ cm). Con respecto al Caso 3 se obtuvo la mayor eficiencia de absorción con 38.24 % siendo un 28.40 % mejor que al Caso 1 y un 20.86 % con respecto al Caso 2.

Tabla 2. Comparación de las eficiencias térmicas del sistema PCM-TW vs C-TW para el periodo más frío.

x_{PCM} (cm)	$\eta_{th,d}$ (%)	$\eta_{th,n}$ (%)	η_{a-s} (%)	η_d (%)
Caso 1: PCM-TW ($L_w = 11$ cm)				
1	24.62 (59.55)	-0.06 (101.03)	22.39 (41.45)	53.78 (23.22)
3	23.74 (53.85)	0.90 (85.34)	23.64 (38.17)	57.18 (18.36)
5	22.77 (47.62)	1.95 (68.52)	25.06 (34.45)	60.07 (14.24)
7	21.89 (41.89)	2.89 (53.31)	26.33 (31.15)	62.23 (11.14)
9	21.10 (36.76)	3.75 (39.54)	27.38 (28.40)	62.91 (10.18)
Caso 2: PCM-TW ($L_w = 15$ cm)				
1	20.87 (35.29)	2.65 (57.16)	26.05 (31.87)	60.70 (13.33)
4	19.79 (28.28)	3.78 (38.95)	27.70 (27.56)	66.31 (5.33)
7	18.81 (21.95)	4.79 (22.64)	29.23 (23.55)	72.92 (4.11)
10	18.08 (17.21)	5.58 (9.98)	30.26 (20.86)	75.92 (8.40)
13	18.08 (17.21)	5.58 (9.99)	30.26 (20.86)	75.92 (8.39)
Caso 3: C-TW ($L_w = 30$ cm)				
---	15.43	6.20	38.24	70.04

Con respecto a la η_d de manera similar a los casos anteriores. Los resultados indican que utilizar el PCM a 9 cm y 10 cm proporcionan el mayor tiempo de suministro de energía térmica hacia la habitación durante los periodos nocturnos de los tres días para los Caso 1 y 2, con eficiencias de descarga de 62.91 % y 75.92 % respectivamente. Sin embargo, para el Caso 3 se logró mejorar un 10.18 % con respecto al Caso 1, aunque una disminución del 8.40 % en comparación con el Caso 2.

Con base en lo anterior, se puede decir que para los Casos 1 y 2 para $x_{PCM} = 1$ cm se presenta la mayor $\eta_{th,d}$ en otras palabras, el sistema entrega la mayor cantidad de energía a la habitación durante el periodo diurno. Sin embargo, para calentamiento nocturno se vuelve la peor ubicación para P-29 obteniendo valores de $\eta_{th,n}$ hasta de -0.06 % y 2.65 %, respectivamente. Significando que para el Caso 1 el sistema termina extrayendo energía de la habitación hacia el medio ambiente. Por otra parte, para $x_{PCM} = 9$ cm y 10 cm el sistema PCM-TW presenta el mejor rendimiento para calentamiento nocturno alcanzado $\eta_{th,n}$ de hasta 3.75 % y 5.58 %, respectivamente.

A continuación, se presentan los flujos de calor por parte del sistema TW hacia la habitación, de acuerdo con los mejores casos obtenidos con base en los resultados de la Tabla 2. Caso 1 ($x_{PCM} = 9$ cm), Caso 2 ($x_{PCM} = 10$ cm) y Caso 3.

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento del flujo de calor útil (q_c) proporcionado por el canal hacia la habitación para los tres casos seleccionados. Se observa como el q_c presenta prácticamente el mismo comportamiento durante el periodo

diurno. Mientras que, el periodo nocturno los valores negativos presentados por q_c significan que el canal está extrayendo energía de la habitación a través de las ventilas del sistema TW.

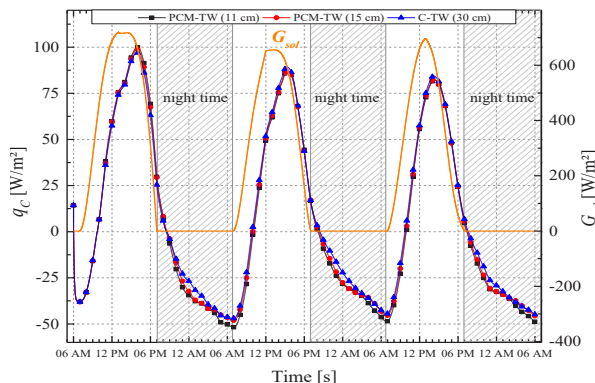


Fig. 4 Comportamiento del flujo de calor útil por parte del canal hacia la habitación para el periodo frío.

Sin embargo, para el periodo nocturno se muestran ligeras diferencias entre la 3:00 am a 6:00 am. Donde, el Caso 3 de referencia presenta un comportamiento descendente suavizado en comparación con el del Caso 1 y 2 esto se debe al proceso de liberación de energía del P-29 el cual tiene muy poca influencia sobre el flujo de calor útil.

En la Fig. 5 se muestran los flujos de calor por parte del muro hacia la habitación (q_{wall}). Se observa que el Caso 1 proporciona un mayor flujo de calor hacia la habitación durante el periodo diurno alcanzando un valor máximo de 150 W/m².

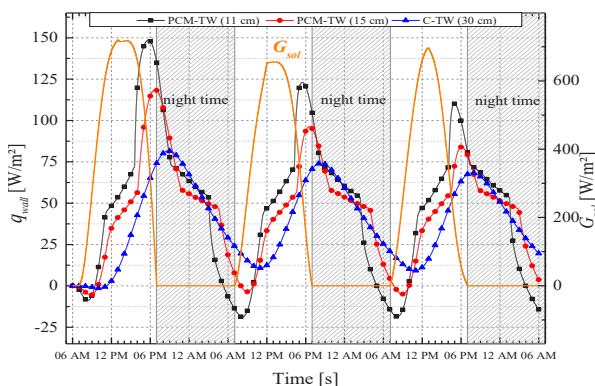


Fig. 5 Comparación del flujo de calor por parte del muro hacia la habitación para el periodo frío.

Mientras que, para el periodo nocturno, el Caso 1 presenta el peor desempeño, tendiendo valores de hasta de -19 W/m² por lo que se termina extrayendo energía de la habitación. Para el caso de referencia se observa un comportamiento suavizado, donde el muro siempre se encuentra entregando energía hacia la habitación.

Adicionalmente, se observa que, el flujo q_{wall} es influenciado por el proceso de fundición y solidificación del PCM, este proceso comienza a partir de las 11:00 am y 12:00 pm para los Caso 1 y 2, respectivamente, observándose una disminución en

la pendiente del flujo de calor, esto debido al consumo del calor sensible para terminar de fundirse completamente a las 3:30 pm y 4:00 pm, permaneciendo fundidos hasta por 7 horas para posteriormente comenzar el proceso de solidificación donde se libera lo almacenado en forma de calor sensible, provocado por el cambio de fase, observándose una disminución en la pendiente de flujo de calor para finalmente alcanzar el estado sólido a partir de las 3:00 am y 4:00 am, esto para el Caso 1 y 2 respectivamente.

Finalmente, en la Fig. 6 se presenta el comportamiento del flujo de calor hacia el interior de la habitación ($q_{int} = q_c + q_{wall}$) se presenta un comportamiento muy similar entre los tres casos de estudio. Donde el Caso 1 entrega una mayor cantidad de energía hacia la habitación durante el día con respecto al Caso 2 y 3.

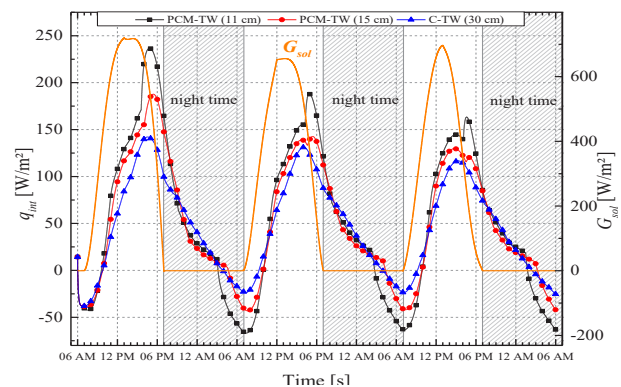


Fig 6. Comparación del flujo de calor al interior de la habitación para el periodo frío.

Donde el Caso 1 presenta el mejor comportamiento del sistema durante el día con un valor máximo de 235 W/m², sin embargo, para la noche se vuelve el peor llegando hasta -65 W/m². Por otro lado, el Caso 3 que cuenta con un muro de 30 cm, presenta el peor desempeño térmico durante el día, entregando sólo 150 W/m². Sin embargo, es el mejor durante el periodo nocturno debido a su gran inercia térmica, lo que le permite sustentar las pérdidas inducidas por q_c y mantener un q_{int} sobre -25 W/m² durante todo el periodo frío. Por su parte, el Caso 2 con un espesor de muro de 15 cm muestra un comportamiento más consistente con el Caso 3 debido a la incorporación del P-29, lo que permite obtener un desempeño equivalente con la mitad del espesor.

5. CONCLUSIONES

Se analizó el efecto de la posición del material de PCM sobre el desempeño térmico de un sistema PCM-TW de 11 cm y 15 cm de espesor de muro y se comparó C-TW de 30 cm bajo las condiciones climáticas del periodo más frío de todo un año para una ciudad con clasificación Köppen Cwa-Cwb de México. Con base en los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- Caso 1 con $x_{PCM} = 9$ cm presento el mejor rendimiento térmico para calentamiento nocturno. Permitiendo almacenar la mayor cantidad de energía durante el día y dosificando de mejor manera esta energía, alcanzando una $\eta_d = 62.9$ % estando sólo un 10 % por debajo del Caso 3.
- Caso 2 con $x_{PCM} = 10$ cm se concluye que ubicar el PCM más allá de esta distancia, no mejora en absoluto el desempeño térmico del PCM-TW. Manteniendo una $\eta_{th,n} = 5.58$ % y $\eta_d = 75.92$ % siendo sólo un 10 % y 8.39 % inferior, respectivamente con respecto al Caso 3.

Como conclusión general: Se puede afirmar que la incorporación adecuada del punto de fusión y ubicación de un PCM el sistema de TW mejora significativamente el desempeño térmico. Tanto así que un PCM-TW con un muro de 15 cm puede asemejar el desempeño térmico de un C-TW de 30 cm.

NOMENGLATURA

h	coeficiente de transferencia de calor ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
T	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
T_{amb}	temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
G_{sol}	radiación solar incidente (Wm^{-2})
L_c	espesor de canal (cm)
L_w	espesor de muro (cm)
C_p	Calor específico ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
x_{PCM}	ubicación del PCM a través del muro con respecto a la superficie absorbadora (cm)
Griegas	
λ	conductividad térmica (Wm^{-1}K)
ρ	densidad (kgm^{-3})
α^*	absortividad
τ^*	transmisividad
ε^*	emisividad
σ	constante de Stefan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$)
δx	distancia entre nodos (m)
Δt	paso de tiempo (s)
Δx	volumen de control (m)
Subíndices	
g	vidrio
f	aire
abs	superficie absorbadora
$wall$	muro almacenador
$room$	Habitación
d	periodo diurno
n	periodo nocturno
Superíndices	
$cond$	conducción
$conv$	convección
rad	radiación

REFERENCIAS

Aparicio. (2021) Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro Trombe con un material de cambio de fase bajo condiciones climáticas de México, Tesis de maestría, UNISON.

Chagolla-Aranda M.A. (2017) Estudio de la transferencia de calor de techos verdes en edificaciones en México. Tesis doctoral, CENIDET.

Churchill S., Chu, H. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 1323-1329.

Dengjia W., Liang H., Hu D., Yanfeng L., Jianxiang H., Yanchao X., Jiaping L. (2020). Classification, experimental, assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109772.

Duan S., Li H., Zhao Z., Wang L. (2021) Investigation on heating performance of an integrated phase change material Trombe wall based on state space method. *Journal of Energy Storage*, 38, 102460.

Hernández-López I. (2016). Análisis de la transferencia de calor conjugada en un sistema solar pasivo de muro Trombe para calentamiento y ventilación, Tesis doctoral, CENIDET.

Incropera F., De Witt, D. (2002). Fundamentals of heat and mass transfer, (5ta ed.), John Wiley, New York.

International Energy Agency. (2022). World Energy Balance.

Morse, E.S. (1881). Warming and ventilating apartments by the sun's rays, U.S. Patent, 246-626.

Qingang X., Hashim M., Rezvan M., Tahar T., Fida M., Ahmad H., Mostafa D., Mohsen I. (2022). Application of phase change material in improving trombe wall efficiency: An up-to-date and comprehensive overview. *Energy and Building*, 258, 111824.

Rabani M., Kalantar, V., Faghih A.K., Rabani, M., Rabani, R. (2013). Numerical simulation of a trombe wall to predict the energy storage rate in non-sunny periods. *Heat Mass Transfer*, 49, 1395-1404.

SENER. (2019). Balance Nacional de Energía. 29-36.

United Nations Environment Programme. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector - Executive Summary.

Utzinger D., Klein, S., Mitchell, J. (1980). The effect of air rate in collector-storage wall, *Solar Energy*, 25, 511-519.

Wei K., Jie J., Chengyan Z., Hao X., Yayun T., Chuyao W. (2023). Effect of the PCM layer position on the comprehensive performance of a built-middle PV-Trombe wall system for building application in the heating season. *Energy*, 267, 126562.

Xiaoqin S., Jovana J., Yuan Z., Siyuan F., Youhong C., Yajing M., Shuguang L. (2019). Use of encapsulated phase change materials in lightweight building walls for annual thermal regulation. *Energy*. 180, 858-872.

Eficiencia térmica en colectores solares planos con nanofluidos de índole óxido-metálico

M. A. García-Rincón, y J. J. Flores-Prieto

Tecnológico Nacional de México-CENIDET

Int. Internado Palmira s/n, Cuernavaca, Morelos, México, ZIP 62490,

marco.garciaaex@gmail.com; jose.fp@tecnm.cenidet.edu.

Resumen: Este trabajo presenta un comparativo del desempeño térmico de un colector de placa plana trabajando con nanofluidos de trabajo de índole óxido-metálico ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{Cu-H}_2\text{O}$ y $\text{CuO-H}_2\text{O}$) a diferentes concentraciones (0-0.05%). La eficiencia térmica y los coeficientes de desempeño se comparan entre sí, con referencia al agua como fluido de trabajo. El desempeño térmico se determinó con modelos basados en balances de conservación de energía y masa, y con datos experimentales de calorimetría de flujo reportados. Con concentración de nanopartículas de 0.05%, el a_0 aumentó el 56, 26 y 7%, a la vez que a_1 se redujo el 74, 36 y 15% con nanofluido de Al_2O_3 , CuO y Cu respectivamente. El mayor incremento de eficiencia respecto al agua lo mostró el nanofluido de Al_2O_3 con un 63%, logrando eficiencias del 76%. En el trabajo se observó que los nanofluidos mejoran el transporte de calor modificando sus propiedades termofísicas, sin embargo, la densidad, la viscosidad y el calor específico deben considerarse para identificar el grado de afectación.

Palabras clave: colector solar de placa plana; calentadores solares de agua; nanofluidos; eficiencia con nanofluidos.

1. INTRODUCCIÓN

El mercado de la energía solar ha tenido un crecimiento considerable gracias a los sistemas de calentamiento de agua CONUEE (2018). El crecimiento de 2020 a 2021 fue de 3%, con 31 millones de metros cuadrados instalados, equivalentes a 21 *GW* térmicos, de acuerdo con Intersolar (2022). En general, el calentamiento solar se utiliza en secado de alimentos, precalentamientos de caldera, calentamiento de agua sanitaria y en climatización de edificios, en donde se requiere temperatura en el intervalo de 30-90 °C Alawi *et al.* (2021). Para esto, los colectores solares planos han venido siendo una buena opción, sin embargo, aun con su bajo impacto ambiental, su desempeño energético se observa limitado al compararlo con otras alternativas energéticas. Así las alternabas de mejoramiento del desempeño de colectores solares planos continúan siendo un área de oportunidad.

Los nanofluidos tienen un gran potencial para los sistemas térmicos debido a sus diversas propiedades termofísicas principalmente en el coeficiente de transferencia de calor por conducción y convección Tiwari *et al.* (2012). Las propiedades

de transferencia de calor agregando pequeñas proporciones de volumen de nanopartículas son superiores a las de los fluidos convencionales Jang y Choi (2004). Trabajos previos reportan que la conductividad térmica de los nanofluidos es más de un 10% superior a la de otros fluidos He *et al.* (2015).

El uso de nanofluidos se ha mostrado como opción para el aumento del desempeño de colectores solares, que ha llegado a reportarse hasta del 30% adicional, Verma y Tiwari (2015). Las propiedades termofísicas de los fluidos caloportadores pueden incrementar el transporte de calor por conducción, convección y radiación, así como se ha reportado en colectores solares de placa plana, Akram *et al.* (2019). Lee *et al.* (2020) reporta que las partículas metálicas u óxido metálicas en el fluido base incrementan la eficiencia del 50 al 70%.

En la actualidad, los estudios se han enfocado a enriquecer el rendimiento de los calentadores solares de agua mediante el uso de diferentes tipos de nanofluidos como medio de trabajo Verma y Tiwari (2015). La mayoría de los trabajos reportados evalúan el desempeño de colectores basándose calorimetría de flujo de acuerdo con normas, como ANSI/ASHRAE 93-2010.

El modelado del desempeño de colectores solares planos se realiza de acuerdo con Duffie and Beckman (2013) ya que han sido la base en los estándares internacionales y nacionales ANSI/ASHRAE 93-2010 e ISO 9806-1. Los ajustes de modelos teóricos con datos experimentales son importantes para reducir incertidumbres en el modelado. Con lo anterior, en este documento se presenta un estudio del efecto del tipo de nanopartículas y su concentración en las eficiencias de un colector solar de placa plana y sus factores de eficiencia al utilizar nanofluidos de índole óxido-metálicos, utilizando el método propuesto por Duffie and Beckman (2013).

2. MATERIALES Y MÉTODO

En el estudio, la eficiencia térmica y los coeficientes de desempeño que se determinan para tres diferentes nanopartículas óxido-metálicas y porcentajes de concentración (0-0.05%). El desempeño térmico de los colectores solar plano con/sin nanofluidos se determinó con modelos basados en balances de conservación de energía y masa Duffie and Beckman (2013), y con datos experimentales de calorimetría de flujo reportados Nasrin *et al.* (2014).

2.1 Muestra de estudio

En la **Figura 1** se muestra un despiece del colector solar plano encapsulado, Montoya Márquez y Flores Prieto (2017). El colector tiene una relación de aspecto de 40, superficie total de 2.0 m^2 (2.0 m de largo y 1.0 m de ancho), y un área de absorción de 1.71 m^2 ($0.95 \times 1.8 \text{ m}$). La placa de absorción se conforma de dos tubos cabezales horizontales unidos con cinco tubos de elevación, y está terminada en pintura negro mate de 0.94 de absorbancia. Los tubos de elevación tienen aletas unidas con soldadura plomo-estaño.

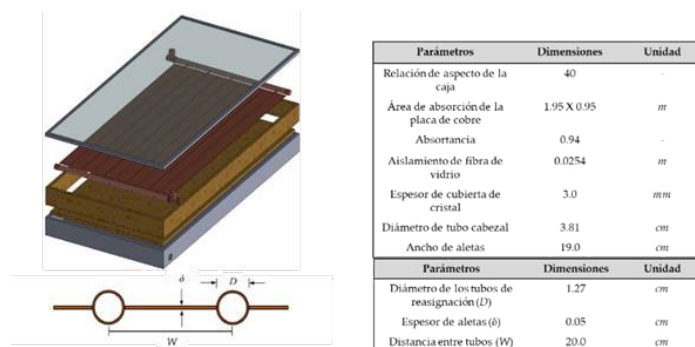


Fig. 1. Colector solar de placa plana.

Los nanofluidos óxido-metálicos utilizados fueron Al_2O_3 , CuO y Cu con relación a cuando se utiliza agua como fluido de trabajo. Los nanofluidos seleccionados son los más utilizados en trabajos previos y esto permite trazar la línea base Akram *et al.* (2019). El flujo másico en el colector solar de placa plana

fue de 0.016 kg/s siguiendo la norma UNE-EN ISO 9806:2013 "Energía solar para métodos de ensayo en exteriores, respetando las mismas condiciones para la evaluación del rendimiento térmico en captadores solares térmicos", la temperatura ambiente fue de 304K , la temperatura de entrada constante de 300K y un porcentaje de partículas disueltas de 0-0.05%.

Las propiedades de los nanofluidos óxido-metálicos se muestran en la **Tabla 1**, Nasrin *et al.* (2014).

Tabla 1. Propiedades termofísicas del fluido y las nanopartículas

Propiedad física	Fluido base (agua)	CuO	Cu	Al_2O_3
$C_p \text{ (J / kg K)}$	4179	385	535	765
$\rho \text{ (kg / m}^3\text{)}$	997	8933	6500	3970
$k \text{ (W / m K)}$	0.613	400	20	40

2.2 Método

La eficiencia térmica del colector solar con y sin nanofluidos se determina con la **Ecuación 1**.

$$\eta = a_0 + a_1 \left(\frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (1)$$

donde a_0 y a_1 se determinan con las ecuaciones 2 y 3.

$$a_0 = F_R (\tau\alpha) \quad (2)$$

$$a_1 = F_R U_L \quad (3)$$

El producto absorbancia-transmitancia, se determina con la **Ecuación 4**.

$$(\tau\alpha)_\theta = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_{dif}} \quad (4)$$

donde τ es la transmitancia de la cubierta (0.92), α es la absorbancia de la placa absorbadora (0.93), ρ_{dif} es la reflectancia del vidrio (0.04). Con lo anterior $(\tau\alpha)_n$ tiene valor de 0.86.

El U_L se calculó con balances de energía, considerando los flujos de calor que entran y que salen del colector solar **Figura 2**, despreciando el calor que se puede almacenar en el colector solar.

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{Q}_{sal} \quad (5)$$

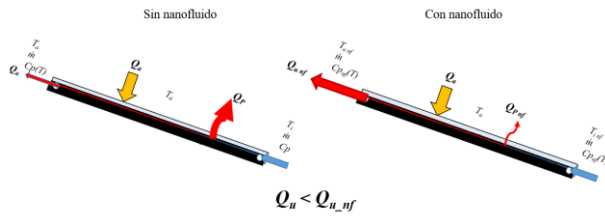


Fig. 2. Flujos de energía a través del colector solar de placa plana.

De acuerdo con la **Figura 2**, y considerando un balance de energía, U_L se escribe como se indica en la **Ecuación 6**.

$$U_L = \frac{[(A_c \cdot I) - [\dot{m} C_p (T_o - T_i)]]}{A_c (T_{mp} - T_a)} \quad (6)$$

La eficiencia estándar de las aletas rectas con perfil rectangular se calcula con la **Ecuación 7**.

$$F = \frac{\tanh\left[\frac{m(W-D)}{2}\right]}{\frac{m(W-D)}{2}} \quad (7)$$

donde m se puede expresar como (8):

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (8)$$

W y D son medidas características del colector solar, obtenidas en trabajos anteriores García Rincón *et al.* (2022).

El factor de eficiencia del colector F' se determina con la **Ecuación 9**.

$$F' = \frac{1}{U_L \left[\frac{1}{W[D + (W-D)F + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h}]} \right]} \quad (9)$$

donde, D_i es el diámetro interno de los tubos de reasignación (m). La conductancia de enlace C_b puede ser muy importante para describir con precisión el rendimiento del captador y se puede calcular con la **Ecuación 10**.

$$C_b = k_b \frac{b}{\gamma} \quad (10)$$

donde k_b es la Conductividad térmica de la unión, γ es el espesor medio de la unión, y b es la anchura del enlace. El factor de remoción de calor del colector puede calcularse con la **Ecuación 11**.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p}\right) \right] \quad (11)$$

donde, $\dot{m}$ es flujo másico (kg/s), C_p es el calor específico del fluido ($J/kg \cdot K$), A_c es el área del colector (m^2). El coeficiente de transferencia de calor por convección se determina con la **Ecuación 12**.

$$h = \frac{Nu k_f}{L} \quad (12)$$

donde los valores de Nu se obtuvieron de Nasrin *et al.* (2014). para diferentes porcentajes de partículas disueltas en el fluido base, así como los parámetros termofísicos del fluido, como se muestra en la **Tabla 1**.

La conductividad térmica del nanofluido a diferentes concentraciones se determina con la **Ecuación 13**, propuesto por Maxwell (1881).

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\phi} \quad (13)$$

donde k_{nf} , k_f y k_s representan las conductividades térmicas del nanofluido, el fluido base y las nanopartículas, respectivamente, y ϕ la fracción volumétrica de las partículas. El calor específico del nanofluido se calcula con la **Ecuación 14**, siguiendo a Xuan y Roetzel (2000).

$$(c_p)_{nf} = \frac{\phi \rho_s (c_p)_s + (1-\phi) \rho_f (c_p)_f}{\rho_{nf}} \quad (14)$$

Donde $(C_p)_{nf}$, $(C_p)_f$, $(C_p)_s$ son respectivamente los calores específicos del nanofluido, el fluido base y las nanopartículas, y la densidad del nanofluido ρ_{nf} se calcula con la **Ecuación 15**.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (15)$$

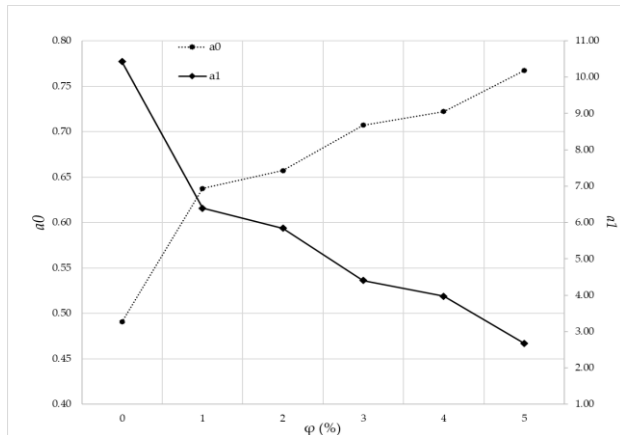
3. RESULTADOS

3.1 Parámetros característicos del colector solar plano

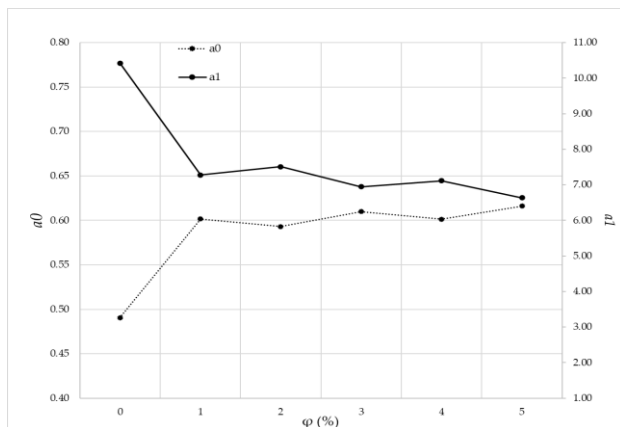
La **Figura 3** muestra el comportamiento de los parámetros característicos a_0 y a_1 del colector solar plano con Al_2O_3 (A) CuO (B) y Cu (C) en función del porcentaje de partícula dispersa en el fluido base. a_0 aumentan potencialmente un 23-26%, 30-56% y 17-7% y a_1 disminuye 30-36%, 39,74% y 22-15% respectivamente.

Este trabajo muestra que para Al_2O_3 los parámetros característicos son inversamente proporcionales al momento de aumentar el porcentaje de nanopartículas disueltas en agua. El CuO muestra un incremento máximo de a_0 a 0.01%, mientras que a_1 sufre un decremento máximo, al incrementar la concentración de partículas el incremento y la disminución de los parámetros se vuelve despreciable. Para el caso de Cu el a_0 tiene su aumento máximo a 0.01% y a_1 su máximo decremento. Sin embargo, al aumentar la concentración de partículas los

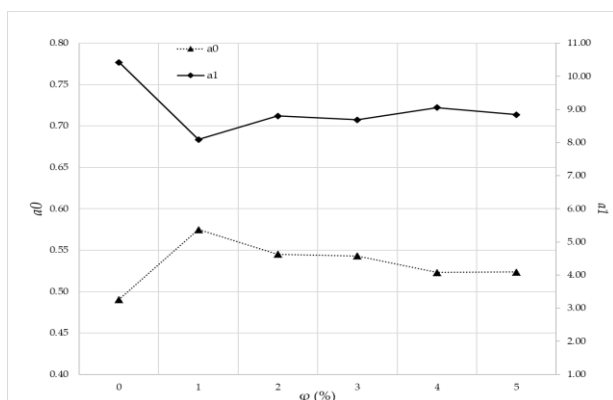
parámetros a_0 y a_1 comienzan a decrecer y aumentar respectivamente.



(A)



(B)



(C)

Fig. 3. Efecto de la concentración de nanopartículas en los parámetros de eficiencia a_0 y a_1 del colector solar plano.

3.2 Eficiencia térmica del colector solar de placa plana con y sin nanofluido

En la **Figura 4** se muestra la eficiencia térmica del colector con alúmina, óxido de cobre y cobre respecto al fluido convencional. La eficiencia térmica teórico-experimental con fluido convencional es prácticamente constante y se sitúa en la media del 50%. Asimismo, se observa que al añadir las nanopartículas de óxido metálico Al_2O_3 la eficiencia aumenta hasta un 63% alcanzando 76%, el óxido de cobre alcanza 60% y el cobre solo alcanza el 56% pero a una concentración de nanopartícula de 0.01%.

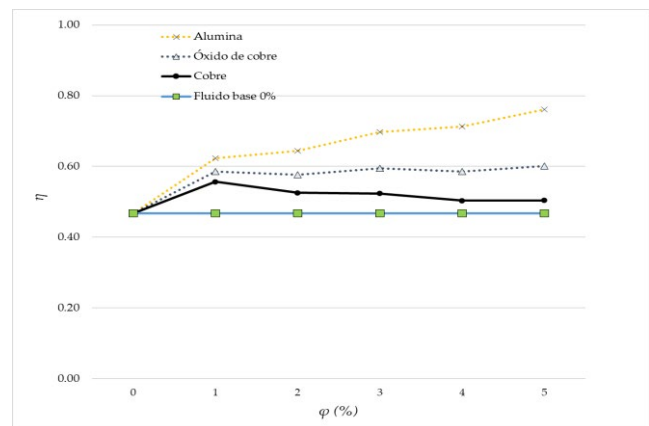


Fig. 4. Efecto de la concentración de nanopartículas en la Eficiencia térmica.

4. CONCLUSIONES

Los nanofluidos mejoran la eficiencia y los parámetros térmicos de los equipos de calefacción solar entre un 8 y un 63% respecto a los fluidos de trabajo convencionales. El mayor rendimiento térmico de 76% se alcanzó utilizando un flujo másico de 0.016 kg/s siguiendo la norma UNE-EN ISO 9806:2013 "Energía solar para métodos de ensayo en exteriores, respetando las mismas condiciones para la evaluación del rendimiento térmico en captadores solares térmicos", temperatura de entrada constante de $300K$ y un porcentaje de partículas disueltas de Al_2O_3 del 0.05%.

Actualmente, la mayoría de los estudios experimentales utilizan nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos, ya que son más baratas y fáciles de conseguir. La aplicación generalizada de los nanofluidos espera suspensiones de nanofluidos que mejoren la estabilidad a temperaturas más elevadas. Sin embargo, la deriva del rendimiento térmico y las propiedades termofísicas con diferentes nanopartículas en el tiempo deben revisarse con mayor detenimiento.

5. TRABAJOS FUTUROS

Es importante realizar análisis de costos y de la eficiencia térmica del colector con periodos que se puedan equiparar a la vida útil de un sistema térmico solar con diferentes nanopartículas e hibridación de estas.

6. FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT y al Tecnológico Nacional de México, cuyos apoyos de gestión y financiero han hecho posible este trabajo.

REFERENCIAS

- Akram, N., Sadri, R., Kazi, S. N., Zubir, M. N. M., Ridha, M., Ahmed, W., Soudagar, M. E. M., & Arzpeyma, M. (2019). A comprehensive review on nanofluid operated solar flat plate collectors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(2), 1309–1343. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08514-z>
- Alawi, O. A., Kamar, H. M., Mallah, A. R., Mohammed, H. A., Kazi, S. N., Che Sidik, N. A., & Najafi, G. (2021). Nanofluids for flat plate solar collectors: Fundamentals and applications. *Journal of Cleaner Production*, 291(125725), 125725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125725>
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. ANSI/ASHRAE 93-2010 (RA 2014), *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2014.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), & Ortega, H. (2018, mayo). *Energía solar térmica para procesos industriales en México*. https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/CSA/estudios/EnergiaSolarTermica_EstudioDeMercado.pdf
- Chávez, J. C. (2022, septiembre 5). Energía solar térmica, la alternativa a la generación fotovoltaica: Intersolar México 2022. *Energía Hoy*. <https://energiahoy.com/2022/09/05/energia-solar-termica-la-alternativa-a-la-generacion-fotovoltaica-intersolar-mexico-2022/>
- Duffie, J.; Beckman, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2013.
- García-Rincón, M. A., Flores-Prieto, J. J., & Montoya-Márquez, O. (2021). Thermal Performance of a Low and Medium Temperature Flat Plate Solar Collector When Controlling the Output-Input Temperature Difference and the Tilt Angle. *Journal of Solar Energy Engineering*, 144(2). <https://doi.org/10.1115/1.4053177>
- He, Q., Zeng, S., & Wang, S. (2015). Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 88, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.053>
- ISO 9806-1 International Standard, *Test Methods for Solar Collectors—Part 1: Thermal Performance of Glazed Liquid Heating Collectors Including Pressure Drop*; ISO: Vernier, Switzerland, 1994.
- Jang, S. P., & Choi, S. U. S. (2004). Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Applied Physics Letters*, 84(21), 4316–4318. <https://doi.org/10.1063/1.1756684>
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2nd ed.) [Libro electrónico]. Academic Press.
- Lee, Y., Jeong, H., Park, J. T., Delgado, A., & Kim, S. (2020). Experimental Investigation on Evaluation of Thermal Performance of Solar Heating System Using Al₂O₃ Nanofluid. *Applied Sciences*, 10(16), 5521. <https://doi.org/10.3390/app10165521>
- Montoya-Marquez, O., & Flores-Prieto, J. (2017). The Effect of the Angle of Inclination on the Efficiency in a Medium-Temperature Flat Plate Solar Collector. *Energies*, 10(1), 71. <https://doi.org/10.3390/en10010071>
- Nasrin, R., Parvin, S., & Alim, M. A. (2014). Heat transfer by nanofluids through a flat plate solar collector. *Procedia engineering*, 90, 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.863>
- Sinelec, E. G. (2020b, enero 9). *El crecimiento de la energía solar*. Grupo Sinelec. <https://gruposinelec.com/el-crecimiento-de-la-energia-solar/>
- Tiwari, Arun & Ghosh, Pradyumna & Sarkar, Jahar. (2012). A review on application of nanofluids in solar heating systems. Conference: *National Conference on Advances in Mechanical Engineering & Emerging Technologies*, April 2012, <https://www.researchgate.net/publication/235785077>
- Verma, S. K., & Tiwari, A. K. (2015). Application of Nanoparticles in Solar collectors: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 3638–3647. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.121>
- Whillier, A. *Prediction of performance of Solar Collectors*. In *Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*; ASHRAE GRP 170; ASHRAE: New York, NY, USA, 1977.
- Xuan, Y., & Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701–3707. [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(99\)00369-5](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(99)00369-5)

Linealización exacta para una clase de sistemas subactuados

Emmanuel Casarrubias *

* Tecnológico Nacional de México, Campus Tláhuac, 13420
Ciudad de México, CDMX (e-mail: emmanuel.cj@tecnm.mx).

Abstract:

El objetivo principal del artículo es presentar una técnica de linealización exacta para un sistema mecánico subactuado de cuarto orden con dos grados de libertad y una entrada de control denominado Flexible Joint Robot, el cual es un sistema pendular que posee propiedades no lineales. En el artículo se describen los pasos necesarios para realizar la linealización exacta alrededor de un punto de operación, se seleccionan las variables de estado más adecuadas para describir el comportamiento del sistema y se implementa un controlador no lineal de alto orden utilizando estas variables de estado para estabilizar el sistema alrededor del punto de operación. Se presentan los resultados de simulaciones para evaluar la efectividad de la técnica de linealización exacta propuesta para medir la robustez y la efectividad del controlador no lineal en comparación con el controlador implementado al sistema subactuado sin la linealización. Se destaca la importancia de esta técnica en aplicaciones de robótica y control de movimiento, así como las posibilidades de aplicación en otros sistemas similares.

Keywords: Sistemas subactuados, Linealización exacta, Retroalimentación de estados

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería mecánica implica el diseño y análisis de sistemas mecánicos complejos, con desafíos como equilibrar requisitos de rendimiento, costos, seguridad y confiabilidad. Los sistemas mecánicos subactuados presentan un desafío particularmente difícil. La técnica de linealización exacta es esencial para mejorar el rendimiento y controlar estos sistemas. Los ingenieros mecánicos deben buscar soluciones innovadoras para superar este reto. La comprensión y aplicación de la linealización exacta en sistemas mecánicos subactuados es esencial para mejorar su desempeño y control.

2. FLEXIBLE JOINT ROBOT

Un Flexible Joint Robot (FJR) de un grado de libertad utiliza una articulación flexible para permitir una mayor movilidad y flexibilidad, así como para aumentar la seguridad de los operadores. Sin embargo, la articulación flexible es la única fuente de movimiento, lo que convierte al FJR de un grado de libertad en un sistema mecánico subactuado. Esto puede dificultar el control del robot en comparación con un robot completamente actuado.

Por lo tanto, para lograr un control preciso y estable de un FJR de un grado de libertad, puede ser necesario

* Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

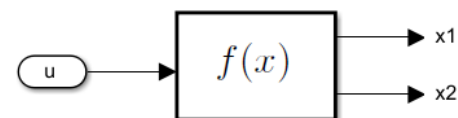


Fig. 1. Diagrama de bloques de un sistema subactuado combinar la linealización exacta con técnicas de control no lineal, como la retroalimentación no lineal.

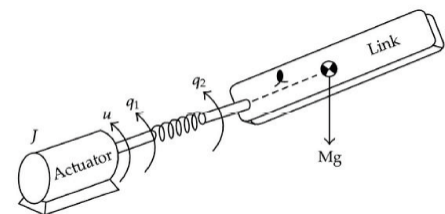


Fig. 2. Modelo de un manipulador de un solo enlace con articulación flexible (Modelo de Mark W. Spong).

3. MODELADO MATEMÁTICO

Considerando un robot manipulador de un grado de libertad con flexibilidad en la unión actuado por medio de un motor DC, donde la elasticidad es modelada como un resorte torsional con características conocidas que por simplicidad se considera como un resorte lineal de elasticidad K_s . Las coordenadas generalizadas del ángulo

que genera el eslabón θ_1 y el angulo que genera la rotación del motor θ_2 forman un par de ecuaciones

$$q_1 = \theta_1 \quad (1)$$

$$q_2 = \theta_2 \quad (2)$$

con I la inercia del motor y J la inercia del eslabón sobre el eje de rotación. La energía cinética total del sistema consiste en la energía cinética del motor y la energía cinética del eslabón

$$K_C = \frac{1}{2}I\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J\dot{q}_2^2 \quad (3)$$

La energía potencial está dada por

$$V = \frac{1}{2}K_s(q_1 - q_2)^2 + mgl(1 - \cos(q_1)) \quad (4)$$

Donde m es la masa del eslabón, l es la distancia que existe entre el centro de masa del eslabón y el eje de rotación y g es la constante de gravedad. El Lagrangiano del sistema se define como la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial dada por

$$\mathcal{L} = T - V \quad (5)$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}I\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J\dot{q}_2^2 - mgl(1 - \cos(q_1)) \quad (6)$$

Las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange pueden escribirse de la siguiente forma

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} \right) = \tau_j \quad (7)$$

Donde

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} = \begin{bmatrix} I\dot{q}_1 \\ J\dot{q}_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} \right) = \begin{bmatrix} -K_s(q_1 - q_2) - mgl\sin(q_1) \\ K_s(q_1 - q_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} = \begin{bmatrix} I\dot{q}_1 \\ J\dot{q}_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} \right) = \begin{bmatrix} I\ddot{q}_1 \\ J\ddot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\tau_j = \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (10)$$

La dinámica del sistema está dada por un par de ecuaciones diferenciales de segundo orden en coordenadas generalizadas que se encuentran acopladas entre sí

$$\begin{cases} I\ddot{q}_1 + mgl\sin(q_1) + K_s(q_1 - q_2) = 0 \\ J\ddot{q}_2 - K_s(q_1 - q_2) = u \end{cases} \quad (11)$$

las cuales pueden ser escritas en el espacio de estados estableciendo

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] \\ \mathbf{x}^T &= [q_1 \ \dot{q}_1 \ q_2 \ \dot{q}_2] \Rightarrow \\ \dot{\mathbf{x}}^T &= [\dot{q}_1 \ \ddot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \ddot{q}_2] \end{aligned} \quad (12)$$

Lo que da a la ecuación de estado

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -(\frac{mgl}{I})\sin(x_1) - (\frac{K_s}{I})(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ (\frac{K_s}{J})(x_1 - x_3) + \frac{1}{J}u \end{bmatrix} \quad (13)$$

4. ESPACIO DE ESTADOS

El sistema de control no lineal afín al tiempo continuo de la forma

$$\dot{\mathbf{x}} = f(x) + \sum_{i=1}^n g_i(x)u_i \quad (14)$$

con los campos vectoriales

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -(\frac{mgl}{I})\sin(x_1) - (\frac{K_s}{I})(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ (\frac{K_s}{J})(x_1 - x_3) \end{bmatrix} \quad (15)$$

y

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} \quad (16)$$

talque

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -(\frac{mgl}{I})\sin(x_1) - (\frac{K_s}{I})(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ (\frac{K_s}{J})(x_1 - x_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} u_i \quad (17)$$

Puede ser transformado mediante retroalimentación de estados y un cambio de coordenadas en un sistema lineal y además controlable.

5. CAMBIO DE COORDENADAS

Puede ser transformado mediante retroalimentación de estados y un cambio de coordenadas en un sistema lineal y además controlable.

Es necesario calcular las funciones $ad_f g(x)$, $ad_f^2 g(x)$ y $ad_f^3 g(x)$ y corroborar si las siguientes dos condiciones necesarias y suficientes son satisfechas

5.1 Condiciones suficientes y necesarias

- I. $rank \{g, ad_f g(x), ad_f^2 g(x), ad_f^3 g(x)\}$

- II. El conjunto $\{g, ad_f g(x), ad_f^2 g(x)\}$ es involutivo.

Obteniendo el Jacobiano de dimensión 4x4

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \cos(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}} & 0 & \frac{K_s}{\mathcal{I}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_s}{\mathcal{J}} & 0 & -\frac{K_s}{\mathcal{J}} & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\frac{\partial g}{\partial x} = 0$$

Para los paréntesis de Lie $ad_f^0 g, ad_f^1 g, ad_f^2 g$ y $ad_f^3 g$ se tiene que

$$ad_f^0 g = g$$

$$ad_f^0 g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{\mathcal{J}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$ad_f^1 g = [f, g]$$

$$ad_f^1 g = \frac{\partial g}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} g$$

$$ad_f^1 g = 0 - \begin{bmatrix} * & * & * & 0 \\ * & * & * & 0 \\ * & * & * & 1 \\ * & * & * & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{\mathcal{J}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{\mathcal{J}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$ad_f^2 g = [f, ad_f^1 g]$$

$$ad_f^2 g = \frac{\partial(ad_f^1 g)}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} ad_f^1 g$$

$$ad_f^2 g = 0 - \begin{bmatrix} * & * & 0 & * \\ * & * & \frac{K_s}{\mathcal{I}} & * \\ * & * & \frac{\mathcal{I}}{0} & * \\ * & * & -\frac{K_s}{\mathcal{J}} & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{\mathcal{J}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \\ 0 \\ -\frac{K_s}{\mathcal{J}^2} \end{bmatrix}$$

$$ad_f^3 g = [f, ad_f^2 g]$$

$$ad_f^3 g = \frac{\partial(ad_f^2 g)}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} ad_f^2 g$$

$$ad_f^3 g = 0 - \begin{bmatrix} * & 1 & * & 0 \\ * & 0 & * & 0 \\ * & 0 & * & 1 \\ * & 0 & * & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \\ 0 \\ -\frac{K_s}{\mathcal{J}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \\ 0 \\ \frac{K_s}{\mathcal{J}^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

5.2 Grado Relativo

La Matriz

$$P = [g, ad_f^1 g, ad_f^2 g, ad_f^3 g]$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \\ 0 & 0 & \frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\mathcal{J}} & 0 & \frac{K_s}{\mathcal{J}^2} \\ \frac{1}{\mathcal{J}} & 0 & -\frac{K_s}{\mathcal{J}^2} & 0 \end{bmatrix}$$

con

$$\det(P) = \frac{1}{\mathcal{J}^2} \left(\frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \right)^2 \neq 0$$

siempre y cuando $K_s > 0$ y $\mathcal{I}, \mathcal{J} < \infty$

De este modo, $\det(P) \neq 0$, lo que significa que $\text{rank}(P) = 4$, es decir de rango completo y por lo tanto la condición I se satisface.

La condición II requiere que el conjunto $\{g, ad_f g, ad_f^2 g\}$ sea involutivo, los campos vectoriales $\{g, ad_f g, ad_f^2 g\}$ son constantes, así que la condición II se satisface.

Por lo tanto el sistema

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -(\frac{mgl}{\mathcal{I}}) \sin(x_1) - (\frac{K_s}{\mathcal{I}})(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ (\frac{K_s}{\mathcal{J}})(x_1 - x_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\mathcal{J}} \end{bmatrix} u_i$$

Es linealizable vía retroalimentación de estados.

La transformación $\xi = T(x)$ se calcula a partir de la siguiente expresión

$$\begin{cases} < dT_1, ad_f^k g > = 0 \\ < dT_1, ad_f^3 g > \neq 0 \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2$$

También puede ser expresado como

$$\begin{cases} L_{ad_f^k} T_1 = 0 \\ L_{ad_f^3} T_1 \neq 0 \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2$$

Para $k = 0 \rightarrow L_g T_1 = < dT_1, g >$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} & \frac{\partial T_1}{\partial x_2} & \frac{\partial T_1}{\partial x_3} & \frac{\partial T_1}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{\mathcal{J}} \end{bmatrix} = 0 \rightarrow$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x_4} = 0$$

Para $k = 1 \rightarrow L_{ad_f^1 g} T_1 = < dT_1, ad_f^1 g >$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} & \frac{\partial T_1}{\partial x_2} & \frac{\partial T_1}{\partial x_3} & \frac{\partial T_1}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{\mathcal{J}} \end{bmatrix} = 0 \rightarrow$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x_3} = 0$$

Para $k = 2 \rightarrow L_{ad_f^2} T_1 = \langle dT_1, ad_f^2 g \rangle$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} & \frac{\partial T_1}{\partial x_2} & \frac{\partial T_1}{\partial x_3} & \frac{\partial T_1}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \\ 0 \\ -\frac{K_s}{\mathcal{J}^2} \end{bmatrix} = 0 \rightarrow$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x_2} = 0$$

Para $k = 3 \rightarrow L_{ad_f^3} T_1 = \langle dT_1, ad_f^3 g \rangle$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} & \frac{\partial T_1}{\partial x_2} & \frac{\partial T_1}{\partial x_3} & \frac{\partial T_1}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \\ 0 \\ \frac{K_s}{\mathcal{J}^2} \\ 0 \end{bmatrix} \neq 0 \rightarrow$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x_1} \neq 0$$

Se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales parciales

$$\frac{T_1}{\partial x_1} \neq 0, \frac{T_1}{\partial x_2} = 0, \frac{T_1}{\partial x_3} = 0, \frac{T_1}{\partial x_4} = 0,$$

Se observa que T_1 puede ser únicamente función de x_1 , entonces $T_1 = T_1(x_1)$; por lo tanto se puede tomar la solución simple

$$T_1 = x_1$$

Los demás componentes de $\xi = T(x)$

$$T_{i+1} = \langle dT_i, f \rangle = L_f T_i$$

$$i = 1, 2, 3$$

Lo que significa que para $i = 1 \rightarrow T_2 = L_f T_1 = \langle dT_1, f \rangle$

$$\langle dT_1, f \rangle = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \\ \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial T_1}{\partial x_4} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \sin(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ \frac{K_s}{\mathcal{J}}(x_1 - x_3) \end{bmatrix}$$

$$\langle dT_1, f \rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ * \\ * \\ * \end{bmatrix} = x_2$$

Para $i = 2 \rightarrow T_3 = L_f T_2 = \langle dT_2, f \rangle$

$$\langle dT_1, f \rangle = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_2}{\partial x_1} \\ \frac{\partial T_2}{\partial x_2} \\ \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial T_2}{\partial x_4} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \sin(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ \frac{K_s}{\mathcal{J}}(x_1 - x_3) \end{bmatrix}$$

$$\langle dT_1, f \rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * \\ -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \sin(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3) \\ * \\ * \end{bmatrix}$$

$$\langle dT_1, f \rangle = -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \sin(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3)$$

Para $i = 3 \rightarrow T_4 = L_f T_3 = \langle dT_3, f \rangle$

$$\langle dT_3, f \rangle = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial T_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial T_3}{\partial x_3} \\ \frac{\partial T_3}{\partial x_4} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \sin(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ \frac{K_s}{\mathcal{J}}(x_1 - x_3) \end{bmatrix}$$

$$\langle dT_3, f \rangle = \begin{bmatrix} -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \cos(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}} & 0 & \frac{K_s}{\mathcal{I}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ * \\ x_4 \\ * \end{bmatrix}$$

$$\langle dT_3, f \rangle = -\frac{mgl}{\mathcal{I}} x_2 \cos(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}} x_2 + \frac{K_s}{\mathcal{I}} x_4$$

La transformación $\xi = T(x)$ adquiere la siguiente forma

$$\xi = \begin{bmatrix} T_1(x) \\ T_2(x) \\ T_3(x) \\ T_4(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ -\frac{mgl}{\mathcal{I}} \sin(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3) \\ -\frac{mgl}{\mathcal{I}} x_2 \cos(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_2 - x_4) \end{bmatrix}$$

$x = T^{-1}(\xi)$ se calcula de la siguiente manera

$$x = \begin{bmatrix} T_1^{-1}(\xi) \\ T_2^{-1}(\xi) \\ T_3^{-1}(\xi) \\ T_4^{-1}(\xi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_1 + \frac{mgl}{K_s} \sin(\xi_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}} \xi_3 \\ \xi_2 + \frac{mgl}{K_s} \xi_2 \cos(\xi_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}} \xi_4 \end{bmatrix}$$

Debido a que $\xi = T(x)$ y $x = T^{-1}(\xi)$ están bien definidos en R^4 además de ser mapeos suaves, significa que T_1 define un **Difeomorfismo Global**

6. LINEALIZACIÓN EXACTA

El objetivo es diseñar un controlador de retroalimentación de estados que convierta el sistema no lineal en un

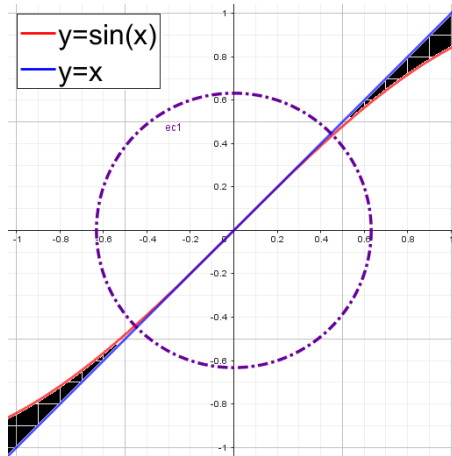


Fig. 3. Esquema de una función no lineal y su aproximación lineal en un área local, el área remarcada en negro es el error de aproximación.

sistema lineal y establezca la estabilidad en un punto de equilibrio deseado; implica el uso de una transformación de coordenadas para encontrar un nuevo conjunto de variables de estado que convierta el sistema no lineal en un sistema linealmente controlable y observable. La entrada de Control no lineal u se encuentra a partir de la condición

$$\begin{aligned} L_f T_4 + L_g T_4 u &= v \Leftrightarrow \\ \langle dT_4, f \rangle + \langle dT_4, g \rangle u &= v \Rightarrow \\ u &= \frac{1}{\langle dT_4, g \rangle} (v - \langle dT_4, f \rangle) \end{aligned}$$

se tiene que

$$\begin{aligned} \langle dT_4, g \rangle &= \begin{bmatrix} \frac{\partial T_4}{\partial x_1} & \frac{\partial T_4}{\partial x_2} & \frac{\partial T_4}{\partial x_3} & \frac{\partial T_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \langle dT_4, g \rangle &= \begin{bmatrix} * & * & * & \frac{K_s}{\mathcal{I}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{K_s}{\mathcal{I}\mathcal{J}} \end{aligned}$$

La entrada de Control no lineal u se encuentra a partir de la condición

$$\begin{aligned} L_f T_4 + L_g T_4 u &= v \Leftrightarrow \\ \langle dT_4, f \rangle + \langle dT_4, g \rangle u &= v \Rightarrow \\ u &= \frac{1}{\langle dT_4, g \rangle} (v - \langle dT_4, f \rangle) \end{aligned}$$

se tiene que

$$\langle dT_4, g \rangle = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_4}{\partial x_1} & \frac{\partial T_4}{\partial x_2} & \frac{\partial T_4}{\partial x_3} & \frac{\partial T_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{K_s}{\mathcal{J}}$$

Para

$$\langle dT_4, f \rangle = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_4}{\partial x_1} \\ \frac{\partial T_4}{\partial x_2} \\ \frac{\partial T_4}{\partial x_3} \\ \frac{\partial T_4}{\partial x_4} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_2 \\ -(\frac{mgl}{\mathcal{I}})\sin(x_1) - (\frac{K_s}{\mathcal{I}})(x_1 - x_3) \\ x_4 \\ (\frac{K_s}{\mathcal{J}})(x_1 - x_3) \end{bmatrix}$$

$$\langle dT_4, g \rangle = \begin{bmatrix} \frac{mgl}{\mathcal{I}}x_2\sin(x_1) & -\frac{mgl}{\mathcal{I}}\cos(x_1) - \frac{K_s}{\mathcal{I}} & 0 & \frac{K_s}{\mathcal{I}} \end{bmatrix} f$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} \langle dT_4, g \rangle &= \frac{mgl}{\mathcal{I}}\sin(x_1)\{x_2^2 + \frac{mgl}{\mathcal{I}}\cos(x_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}}\} \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3) \\ &\quad \{ \frac{mgl}{\mathcal{I}}\cos(x_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}} + \frac{K_s}{\mathcal{J}} \} \end{aligned}$$

Así que la entrada de Control u se define como

$$u = \frac{1}{\langle dT_4, g \rangle} (v - \langle dT_4, f \rangle) \rightarrow$$

$$\begin{aligned} u &= (\frac{\mathcal{I}\mathcal{J}}{K_s}) \{ (v - \frac{mgl}{\mathcal{I}}\sin(x_1)\{x_2^2 + \frac{mgl}{\mathcal{I}}\cos(x_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}}\} \\ &\quad - \frac{K_s}{\mathcal{I}}(x_1 - x_3)\{ \frac{mgl}{\mathcal{I}}\cos(x_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}} + \frac{K_s}{\mathcal{J}} \}) \} \end{aligned}$$

Es posible reescribir u como

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v$$

Donde

$$\begin{aligned} \alpha(x) &= -\frac{mgl}{K_s}\sin(x_1)\{x_2^2 + \frac{mgl}{\mathcal{I}}\cos(x_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}}\} \\ &\quad - \mathcal{J}(x_1 - x_3)\{ \frac{mgl}{\mathcal{I}}\cos(x_1) + \frac{K_s}{\mathcal{I}} + \frac{K_s}{\mathcal{J}} \} \end{aligned}$$

y

$$\beta(x) = \frac{\mathcal{I}\mathcal{J}}{K_s}$$

La ley de Control $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ es llamada **retroalimentación de estados estática** y se encuentra en su forma **regular**.

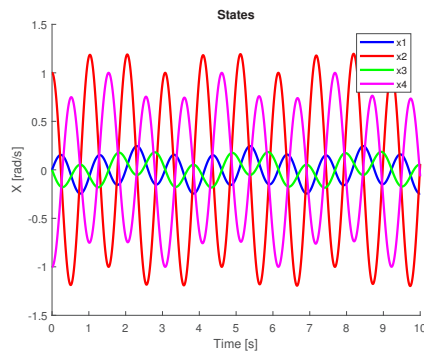


Fig. 4. Respuesta libre de los estados de la planta (13) con condiciones iniciales $x_0 = [0; 1; 0; -1]$

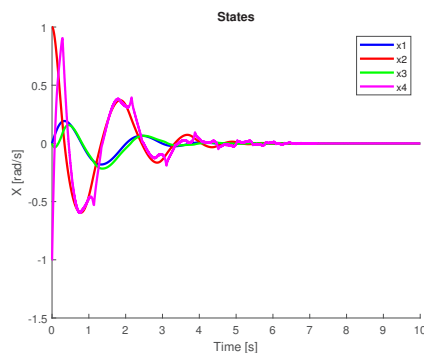


Fig. 5. Estados de la planta linealizada exactamente mediante retroalimentación y estabilizados por medio de un controlador no lineal de cuarto orden $x_0 = [0; 1; 0; -1]$

7. EJEMPLO MOTIVACIONAL

Seleccionando los parámetros del sistema (13) como $K_s = 80$, $\mathcal{I} = 1$, $\mathcal{J} = 1$, $g = 9.81$, $m = 1$ y $l = 1$. Usando el método de integración de Euler y un paso de integración de $1[ms]$, se proporcionan los resultados de simulación del sistema en lazo abierto con condiciones iniciales $x_0 = [0; 1; 0; -1]$. Podemos observar en la Figura 4 que los estados del sistema (13) oscilan de forma continua debido a que la planta no contempla fricción viscosa, por lo cual los estados no convergen al origen.

8. CONCLUSIONES

El artículo describe la aplicación de una técnica de linealización exacta en un sistema mecánico subactuado de cuarto orden con dos grados de libertad y una entrada de control llamado Flexible Joint Robot (FJR). La técnica convierte el sistema no lineal en uno lineal para facilitar su análisis y control. El estudio muestra los pasos necesarios para la linealización, la selección de variables de estado y la implementación de un controlador no lineal para estabilizar el sistema. Además, incluye simulaciones que demuestran la eficacia de la linealización y el controlador.

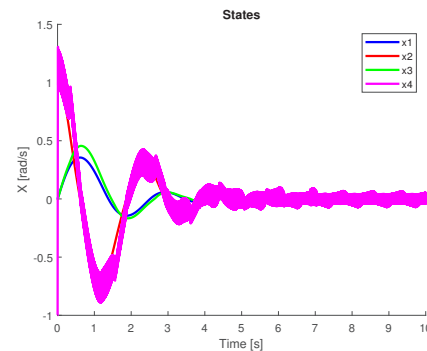


Fig. 6. Respuesta de los estados ante el controlador de cuarto orden sin la implementación de la linealización exacta

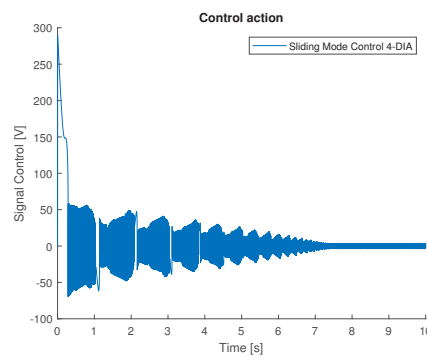


Fig. 7. Señal del Controlador de Cuarto Orden mediante el enfoque de Control por Modos Deslizantes de Orden Superior 4-DIA(Discontinuos Integral Algorithm)

El artículo concluye que la linealización exacta puede mejorar el rendimiento y simplificar el análisis y control de sistemas mecánicos subactuados, y destaca la importancia de buscar soluciones innovadoras para superar los desafíos en esta área.

9. REFERENCIAS

- [1] Guo, X., & Zhou, Z. (2018). Exact linearization and nonlinear control of a 3-DOF underactuated helicopter. *Aerospace Science and Technology*, 75, 231-239
- [2] Liao, Q. (2019). *Robust control of underactuated mechanical systems: Applications to jumping robots*. CRC Press.
- [3] Rao, J. S., & Gupta, A. (2019). *Design and analysis of mechanisms: A planar approach*. CRC Press.
- [4] Yin, Z., & Liu, Y. (2020). Exact linearization and feedback linearization control for an underactuated 3-DOF hover-craft. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18(1), 122-131.
- [5] Karami, E., Karimi, A., & Tavakkoli, A. (2015). Adaptive robust control of flexible-joint robots with uncertain nonlinear dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(1), 70-79.

Voto de sensación térmica en edificios educativos en un clima tropical para temporada cálida y húmeda

J.G Sánchez-Montes*. J.J Flores-Prieto*. L.A López Pérez**. A Martínez-Rebollar*

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México, C.P 62490

e-mail: d19ce009@cenidet.tecnm.mx, jose.fp@cenidet.tecnm.mx

**Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Morelos, México, C.P 62209

Resumen: La sensación térmica tiene un alto nivel de correlación con la temperatura de confort, y considera el contexto social, cultural, económico, etc., de cada persona o grupo de personas, y suele ser diferente para un mismo grupo en diferentes circunstancias. Así, en este trabajo se analiza la diferencia de la sensación térmica, en términos del voto de sensación térmica (VST), de una misma población universitaria, en dos temporadas climáticas (cálida y húmeda). El estudio se realizó en un clima cálido Aw en Tuxtla Gutiérrez Chiapas, en 27 edificios operando en modo aire acondicionado y ventilación natural (AC y VN), con 474 encuestas de la temporada de seca (2017) y 620 de la temporada de lluvia (2022). La información se manejó en *Google Forms*, en archivos *xls*. La sensación térmica en ambas temporadas resultó con una diferencia del 4%, indicando que aun con un incremento considerable en la humedad relativa de 5.7 y 8.6% para AC y VN, respectivamente, la sensación térmica como variable subjetiva presentó sólo un ligero incremento. En trabajos futuros se recomienda realizar el comparativo de el VST bajo el mismo contexto de estudio considerando las mismas condiciones climáticas, pero en diferente ciudad.

Palabras clave: voto de sensación térmica, confort térmico, aire acondicionado, ventilación natural, enfoque adaptativo, edificios educativos, clima tropical.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, el ser humano ha buscado entornos confortables para su desarrollo; desde acercarse al fuego para poder sentir calor; bañarse en un río para poder refrescarse; hasta la construcción de refugios para protegerse del clima exterior. La ergonomía y el confort en un ambiente educativo es de vital importancia [1], los ocupantes que carecen de confort térmico son más propensos a cometer errores y presentar una menor productividad [2]–[4]. La búsqueda de entornos confortables ha llevado a la necesidad de utilizar alternativas mecánicas, como el uso de aire acondicionado en climas tropicales. Sin embargo, el uso de estos sistemas se estima que consume alrededor del 70% de la energía demandada en las edificaciones [5]–[7]. Además, el consumo energético de las edificaciones oscila alrededor del 30-40% de la energía total mundial [8].

Por lo tanto, en las últimas décadas han incrementado los estudios sobre el confort térmico en interiores, proponiendo índices o modelos que ayuden a estimar o predecir el confort térmico [9]. Estos modelos se han desarrollado en diferentes zonas climáticas, en contextos cada vez más específicos, considerando la parte social, la cultura, las características

demográficas, funcionamiento del edificio (AC o VN) entre otras [10]. Recientemente, los modelos de confort térmico han funcionado como una estrategia de climatización para la mitigación del consumo energético en edificaciones, esto sin afectar el confort térmico [11], [12]. En algunos casos, para el desarrollo de estos modelos se considera la percepción de confort térmico del ocupante, considerando la parte subjetiva y personal, como la sensación, la preferencia y el nivel de comodidad térmica [9], entre otros parámetros.

El índice más utilizado para evaluar la sensación térmica de un grupo de personas es el voto medio predicho (PMV, por sus siglas en inglés), el cual se desarrolló en entornos controlados considerando parámetros objetivos como el nivel de actividad, factor de arropamiento, temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura radiante media. Sin embargo, el PMV difiere de indicadores basados en parámetros subjetivos tomados en entornos reales como es el voto de sensación térmica [1], [13], [14]. El VST es tomado de estudios de campo, en los cuales comúnmente se realiza una encuesta a un grupo específico de personas y se pregunta de manera directa sobre su sensación térmica considerando la escala de los siete puntos (frío, fresco, ligeramente fresco, neutro, ligeramente cálido, cálido o muy cálido). Además, el VST tiene un alto nivel de correlación con la

temperatura de confort y el proponer temperaturas que no cumplan con los requerimientos térmicos de los ocupantes genera altos consumos de energía

Actualmente, considerar la sensación térmica de los ocupantes al climatizar una habitación cerrada es una estrategia adecuada para cumplir con el confort térmico y ahorrar energía [11]. Es por ello, la importancia de conocer la sensación térmica de los ocupantes en contextos cada vez más específicos, ya que, la sensación térmica de un grupo de personas puede cambiar dependiendo las circunstancias o el contexto. Sin embargo, los estudios de la sensación térmica considerando diferentes escenarios como la diferencia entre temporadas aún es incierto en climas tropicales de México. Por lo tanto, en este estudio se realiza un comparativo del VST en edificios educativos en modo AC y VN en temporada de seca y temporada de lluvia, esto con el fin de visualizar si existe un cambio significativo entre temporadas. El estudio se aplica a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en clima tropical para edificios educativos pertenecientes al TecNM-ITTG.

2. MATERIALES Y MÉTODO

En la **Figura 1** se presenta la metodología general del estudio. Los parámetros recolectados se toman para la temporada de seca y la temporada de lluvia, (27 de febrero al 31 de mayo de 2017 y 16 de agosto al 14 de octubre de 2022). En ambas temporadas, las encuestas consideraron los parámetros demográficos de los ocupantes como la edad, el peso, el género y la altura. En los parámetros objetivos se consideró el nivel de actividad física, el factor de arropamiento, la temperatura ambiente T_a , humedad relativa HR y la velocidad del aire V_a . En los parámetros subjetivos se consideró el voto de sensación térmica y las preferencias térmicas PT. El comparativo se hace en términos del voto de sensación térmica VST.

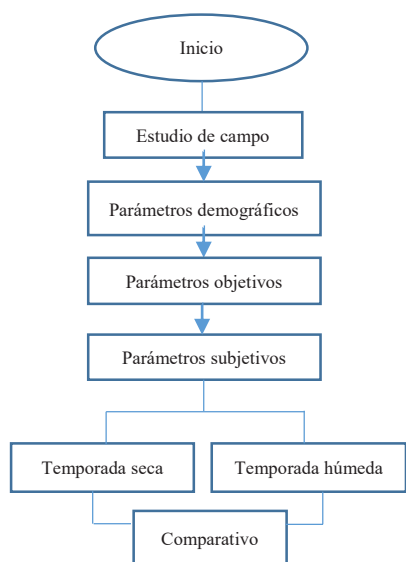


Figura 1. Metodología general del estudio.

El número de datos recolectados se tomó de acuerdo a la Ecuación 1.

$$n = \frac{Z^2 N p q}{E^2 (N - 1) + Z^2 p q} \quad (1)$$

donde Z es el nivel de confianza (1.96), N el tamaño de la población, p la probabilidad de éxito, q la probabilidad de fracaso y E el error.

2.1 Descripción del caso de estudio

En la **Figura 2** se presenta el comportamiento de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento en promedios mensuales a lo largo del año de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La temperatura promedio mensual presenta un intervalo de 22-27 °C, siendo abril y mayo los meses con temperaturas más altas, y diciembre más bajas. La humedad relativa se encuentra en un intervalo de 57-80% teniendo el promedio mensual más bajo para el mes de abril con 57% y el mes con el promedio mensual más alto para septiembre. La velocidad del aire se encuentra en un intervalo de 2-5 m/s en promedios mensuales, teniendo el mes de junio los promedios mensuales más bajos con 2.5 m/s, mientras que, el mes de marzo presenta los promedios mensuales más altos de la velocidad del viento con 4.8 m/s.

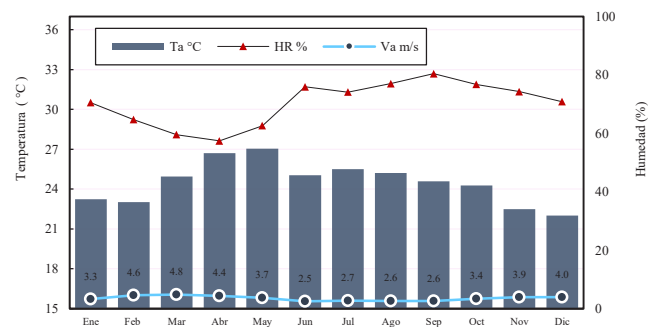


Figura 2. Parámetros ambientales de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en promedios mensuales.

2.2 Estudio de campo

En la **Figura 3** se presenta la estrategia experimental del estudio de campo. En el estudio de campo se encuestó a los ocupantes para conocer su voto de sensación térmica, así como sus características demográficas y parámetros objetivo. La encuesta se basa en la norma ISO 7730 [15] y estudios previos [16]–[18]. Todas las encuestas fueron cara a cara mediante la herramienta *Google Forms* recopilando y manejando los datos en formato *xls*.

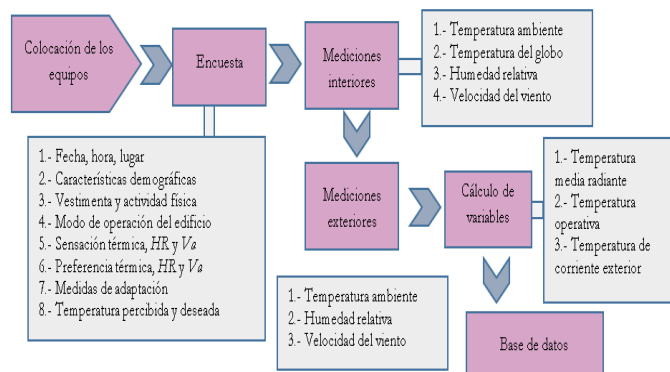


Figura 3. Estrategia experimental para la toma de datos.

El VST se determina con la escala de siete puntos como se muestra en la **Tabla 1**, considerando la norma ASHRAE 55 [19].

Tabla 1. Escala de sensación térmica.

Puntuación	VST
+3	Muy cálido
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutro
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

En todas las mediciones, los sensores funcionan a una distancia de 10 a 20 *cm* de los encuestado, con un tiempo de estabilización de los equipos de 10 *min*. La recopilación de condiciones ambientales al aire libre proviene de la base de datos Meteonorm en la versión V8.1 y corresponde a un año típico meteorológico.

Las características del equipo de medición se muestran en la **Tabla 2**. El equipo se instaló dentro los edificios del ITTG para medir la temperatura del aire interior T_a , la humedad relativa RH y la velocidad del aire V_a . Las mediciones siguen la norma ISO 7243 [20]. T_a y HR se miden con sensores tipo SHT75, marca Sensirion, con una incertidumbre de ± 0.3 $^{\circ}C$ y ± 1.8 %, respectivamente. La velocidad del aire V_a se mide con un anemómetro de hilo caliente I Wireless Smart Probe testo 405i con una precisión de ± 0.1 *m/s*. Todas las mediciones se realizaron por triplicado tomando desde la altura de la cabeza, la cintura y los tobillos [25].

Tabla 2. Equipos de medición utilizados en el estudio de campo.

Parámetros	Nomenclatura	Equipo
Temperatura del aire	T_a	Sensor type SHT75
Humedad relativa	HR	Sensor type SHT75
Velocidad del aire	V_a	Testo 0560 1405

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Campaña de recolección de datos en campo

En la **Figura 4** se presenta la aplicación de las encuestas para determinar los parámetros demográficos, objetivos y subjetivos de los ocupantes del ITTG.



Figura 4. Estudio de campo.

En la **Tabla 3** se presentan las características demográficas, los parámetros objetivos y los subjetivos. Los datos incluyen las características demográficas, el factor de arropamiento, la actividad metabólica, los parámetros ambientales interiores y los parámetros ambientales exteriores.

Tabla 3. Datos recolectados en el estudio de campo.

Temporada	Parámetros	Seca		Lluvia	
		AC	NV	AC	NV
Parámetros demográficos	Edad (años)	28.4	23.7	23.4	21.8
	Peso (kg)	71.8	68.6	70.0	71.2
	Altura (m)	167	167	168	168
	Arropamiento (<i>clo</i>)	0.62	0.61	0.58	0.6
Parámetros objetivos	Actividad (<i>met</i>)	1.1	1.1	1.15	1.1
	T_a ($^{\circ}C$)	23.8	27.1	23.4	26.9
	T_g ($^{\circ}C$)	24.3	27.0	24.2	27.1
	HR (%)	53.0	54.3	58.7	62.9
	V_a (m/s)	0.14	0.14	0.11	0.11
Parámetros subjetivos	VST	-0.8	0.5	-0.6	0.6
	PT	-0.4	0.9	0.4	0.9

3.2 Comparativo del voto de sensación térmica

En la **Figura 5** se presenta el voto de sensación térmica de los encuestados para la temporada de seca y húmeda para edificios en modo AC. Aproximadamente el 65% de los ocupantes presentaron disconfort por frío, sólo el 17% se encontraba dentro de la zona de confort y el 20% se inclinó a sentir disconfort por calor, esto en ambas temporadas. Sin embargo, es de observar que, del rango de -1 a 1 (entre ligeramente fresco, neutro y ligeramente cálido) se encuentran aproximadamente el 50% de los votos. Lo que indica que, el 50% de los ocupantes se encuentran cerca de la zona neutra de confort, y el 50% restante presenta votos de disconfort más alejados de la parte neutra. En

la temporada de seca el VST de (-2, fresco) fue un 14% más que la temporada de húmeda, mientras que para el VST (-3, frío) fue 6% más que para la temporada de húmeda. Para las dos temporadas, es de observar que existe un sobre enfriamiento en los edificios AC, ya que el mayor porcentaje de ocupantes votaron por estar en el rango de (-3 a -1).

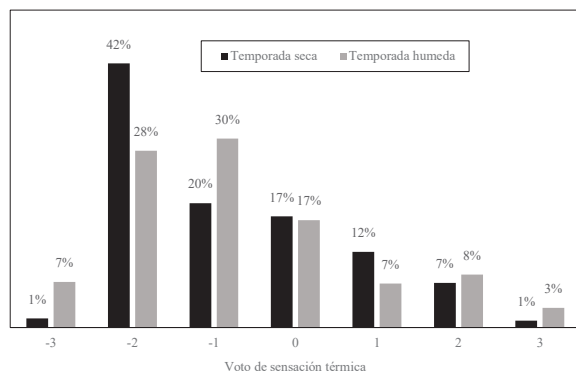


Figura 5. Voto de sensación térmica para temporada de seca y húmeda en edificios AC.

En la **Figura 6** se presenta el voto de sensación térmica para la temporada de seca y húmeda en modo VN. En comparación con AC, para ambas temporadas el 60% de los encuestados votaron por sensaciones térmicas de (1 a 3) inclinándose al discomfort por calor. En el rango de (-1 a 1) hubo un 19% más en temporada de seca que en temporada de lluvia, lo que indica que en temporada de seca hay una mayor inclinación por la adaptación térmica. Los rangos extremos de la escala que son (-3, frío) y (3, muy cálido) no obtuvieron ningún voto, lo que indica que los ocupantes en modo VN son más adaptables a las condiciones extremas que los ocupantes en AC.

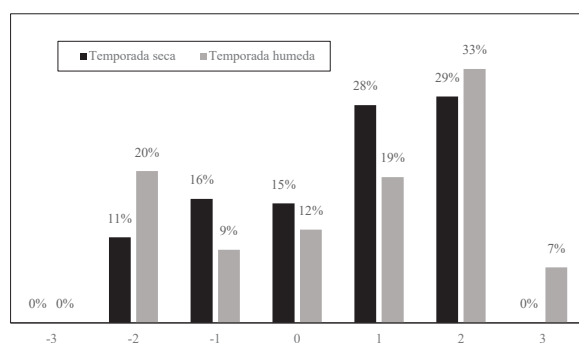


Figura 6. Voto de sensación térmica para temporada de seca y húmeda en edificios VN.

4. CONCLUSIONES

Para AC, en temporada de seca, los ocupantes votaron por sentir temperaturas (63% bajas, 17% neutras y 20% altas) y en temporada de lluvia (65% bajas, 17% neutras y 18% altas). Es de observar que, el voto de sensación térmica en ambas

temporadas es similar con diferencias menores al 3%. En VN, en temporada de seca, los ocupantes votaron por sentir temperaturas (27% bajas, 15% neutras y el 57% altas) y en temporada de lluvia (29% bajas, 12% neutras y 59% altas). De igual manera, en VN, las diferencias entre temporadas fueron menores al 4%. En AC, los ocupantes presentan sensaciones térmicas de fresco a frío, lo que indica que existe un enfriamiento en ambas temporadas en los edificios del ITTG como lo menciona López Pérez (2020) [21] para la temporada de seca. El VST entre temporadas presenta diferencias mínimas (<3%) entre temporadas. En VN, en ambas temporadas presentan discomfort debido a sensaciones de temperatura altas. En AC se observa mayor percepción a temperaturas más bajas alrededor del 66% para ambas temporadas, lo que indica un sobre-enfriamiento en estos edificios. En AC, el VST mostró que, las temperaturas de operación son inadecuadas para los ocupantes del ITTG en ambas temporadas. En trabajos futuros se recomienda comparar el VST en diferentes ciudades con el mismo clima, esto con el fin de visualizar si existe una relación entre el clima y el ocupante o influye el contexto. Lo anterior muestra la relevancia de considerar el voto de sensación térmica de los ocupantes al proponer la temperatura operativa de los sistemas de aire acondicionado.

REFERENCIAS

- [1] E. E. Broday, J. A. Moreto, A. A. de P. Xavier, and R. de Oliveira, "The approximation between thermal sensation votes (TSV) and predicted mean vote (PMV): A comparative analysis," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 69, pp. 1–8, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.09.007>.
- [2] V. Ezratty and D. Ormandy, "Thermal discomfort and health: Protect the susceptible (part 2)," *Environnement, Risques et Sante*, vol. 14, no. 3, 2015, doi: 10.1684/ers.2015.0785.
- [3] K. Karyono, B. M. Abdullah, A. J. Cotgrave, and A. Bras, "The adaptive thermal comfort review from the 1920s, the present, and the future," *Dev. Built Environ.*, vol. 4, p. 100032, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.DIBE.2020.100032.
- [4] S. Sattayakorn, M. Ichinose, and R. Sasaki, "Clarifying thermal comfort of healthcare occupants in tropical region: A case of indoor environment in Thai hospitals," *Energy Build.*, vol. 149, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.05.025.
- [5] S. Attia and S. Carlucci, "Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate," *Energy Build.*, vol. 102, pp. 117–128, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.017.
- [6] Z. Wu, N. Li, P. Wargocki, J. Peng, J. Li, and H. Cui, "Adaptive thermal comfort in naturally ventilated dormitory buildings in Changsha, China," *Energy Build.*, vol. 186, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.01.029.
- [7] S. Semahi, N. Zemmouri, M. K. Singh, and S. Attia, "Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria," *Build. Environ.*, vol. 161, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106271.
- [8] A. Pérez-Fargallo, J. A. Pulido-Arcas, C. Rubio-Bellido, M.

- Trebilcock, B. Piderit, and S. Attia, "Development of a new adaptive comfort model for low income housing in the central-south of chile," *Energy Build.*, vol. 178, pp. 94–106, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2018.08.030.
- [9] B. Lala, H. Rizk, S. M. Kala, and A. Hagishima, "Multi-Task Learning for Concurrent Prediction of Thermal Comfort, Sensation and Preference in Winters," *Buildings*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/buildings12060750.
- [10] Q. Zhao, Z. Lian, and D. Lai, "Thermal comfort models and their developments: A review," *Energy Built Environ.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–33, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENBENV.2020.05.007.
- [11] L. A. López-Pérez, J. J. Flores-Prieto, and C. Ríos-Rojas, "Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate," *Build. Environ.*, vol. 150, pp. 181–194, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.12.011.
- [12] I. Oropeza-Perez, A. H. Petzold-Rodriguez, and C. Bonilla-Lopez, "Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling," *Energy Build.*, vol. 145, pp. 251–258, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.031.
- [13] I. Nastase, C. Croitoru, and C. Lungu, "A Questioning of the Thermal Sensation Vote Index Based on Questionnaire Survey for Real Working Environments," *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 366–374, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.263>.
- [14] J. von Grabe, "Potential of artificial neural networks to predict thermal sensation votes," *Appl. Energy*, vol. 161, pp. 412–424, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.061>.
- [15] ISO, "ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria," *Management*, vol. 3, pp. 605–615, 2005, doi: 10.1016/j.soildyn.2004.11.005.
- [16] L. A. López-Pérez, J. J. Flores-Prieto, and C. Ríos-Rojas, "Comfort temperature prediction according to an adaptive approach for educational buildings in tropical climate using artificial neural networks," *Energy Build.*, vol. 251, p. 111328, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111328.
- [17] S. A. Damiaty, S. A. Zaki, H. B. Rijal, and S. Wonorahardjo, "Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season," *Build. Environ.*, vol. 109, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.024.
- [18] H. Ning, Z. Wang, X. Zhang, and Y. Ji, "Adaptive thermal comfort in university dormitories in the severe cold area of China," *Build. Environ.*, vol. 99, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.01.003.
- [19] ANSI/ASHRAE, "Norma ANSI / ASHRAE 55 - Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado , Atlanta, GA, EE. UU.,," 2017.
- [20] ISO 7243, "Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index," *Int. Organ. Stand.*, 2017.
- [21] L. A. López-Pérez, "Inteligencia Artificial Aplicada al Control de Temperatura en una Habitación Cerrada en Condiciones de Clima Cálido," Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2020.

REDES SOCIALES TecNM/CENIDET

 @TecNMCENIDET.MX

 Cenidet

 Cenidet_oficial

 CENIDET

 <http://cenidet.tecnm.mx/>