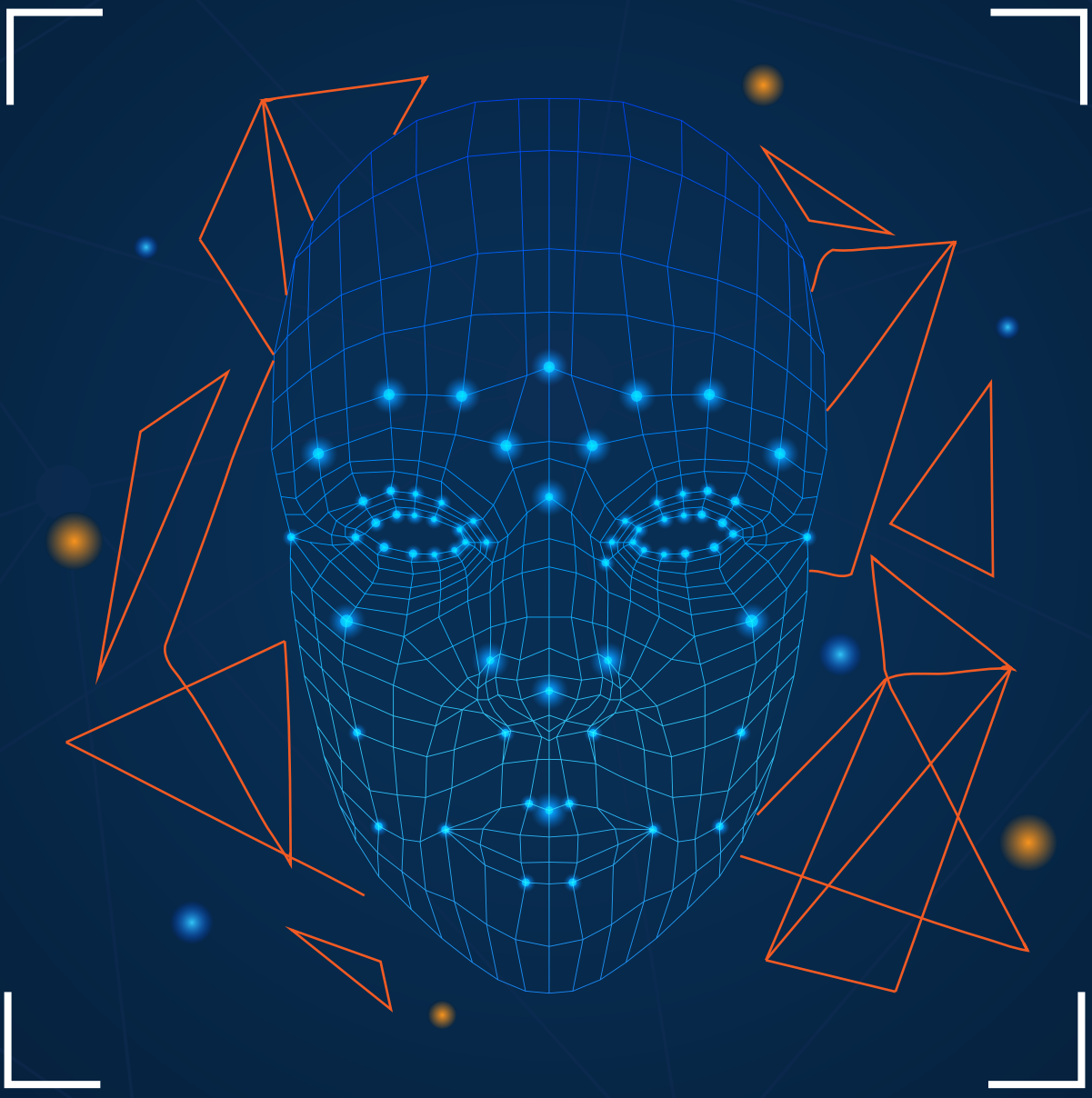
TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Enero-Junio 2022 Vol. 5/Num. 1 ISSN: En trámite



DIfusión Vía Red de Cómputo

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

VOLUMEN 5, NÚMERO 1, ENERO - JUNIO 2022. **ISSN: En trámite.**

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/

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, Volumen 5, Núm. 1, Enero - Junio 2022, es una publicación semestral, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México dependiente de la Secretaría de Educación Pública, a través del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Avenida Universidad No. 1200, 5to. Piso, Colonia Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México, México, Tel. + (52) 5536002500. Ext. 65064, d_vinculacion05@tecnm.mx, Editora Responsable M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2019-0222612512500-2013, ISSN: En trámite, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, docente del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490, Tel. +(52) 777 3627770, fecha de término de última actualización, 20 de Junio del 2022. El objetivo principal de la revista es difundir resultados de proyectos de investigación de estudiantes de posgrado, investigadores y profesores de diferentes instituciones educativas, centros de investigación tanto Nacionales como Extranjeras de las áreas de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Computación, Investigación e Innovación Educativa y Otras Ingenierías.

Para su publicación los artículos son sometidos a arbitraje, su contenido es de la exclusiva responsabilidad de los autores y no representan necesariamente el punto de vista de la Institución. Las publicaciones de los artículos son sometidas a revisión por un comité de arbitraje y el contenido es responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto encargado, salvo que sea citada la fuente de origen.

DIRECTORIO

Dirección General del Tecnológico Nacional de México (TecNM)

Dra. Yesica Imelda Saavedra Benítez
Directora 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
Subdirectora de Planeación y Vinculación del TecNM/CENIDET

Dr. Juan Reyes Reyes
Jefe del Departamento de Gestión Tecnológica y Vinculación del TecNM/CENIDET

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Jefe del Departamento de Desarrollo Académico

Dr. Juan Gabriel González Serna
Jefe del Departamento de Ciencias Computacionales

Dr. Hugo Estrada Esquivel
Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica

Dr. Mario Alejandro Gómez Jiménez
Jefe del Departamento de Ingeniería Mecánica

Portada: Imagen retomada y tratada de la Figura 2. Plantilla de puntos faciales de MediaPipe del artículo titulado Comparativa de Herramientas para Localizar Rostros Ocluidos del área de Ciencias de la Computación

EDITORIAL

La revista académica del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), desde su inicio, el segundo semestre de 2018, es una publicación periódica que presenta artículos científicos escritos por diferentes autores de Instituciones Educativas, Centros e Institutos de Investigación y Empresas a nivel estatal, nacional e internacional.

Las aportaciones presentadas en este número que corresponde al Volumen 5, Número 1 del periodo enero - junio 2022 de la Revista Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada del CENIDET, contiene 71 enriquecedores trabajos de actualidad sobre investigación y desarrollo en tópicos como Visión Artificial, Computación Afectiva, Ciencia de Datos, Modelado, Estimación e Identificación de Sistemas, Diseño de Sistemas de Control, Aplicación en energías renovables, Confort térmico en edificaciones, Manufactura y diseño mecánico, Biomecatrónica, Biomecánmica, Modelos de Negocios, Biotecnología, Innovación, Tecnologías adecuadas social y ecológicamente, Recursos tecnológicos y métodos pedagógicos y Experiencias e-learning, entre otras.

Cada trabajo fue revisado por un Comité de Arbitraje Interno y Externo conformados por expertos en cada una de las 5 principales Temáticas; Ciencias de la Computación, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecánica, en Innovación e Investigación Educación y en otras Ingenierías de diferentes campus del Sistema Tecnológico Nacional de México (TecNM) como: Cuautla, Chihuahua, Hermosillo, Orizaba y Tuxtla Gutiérrez, además de otras instituciones como la Universidad Autónoma de Baja California, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, el Instituto Politécnico Nacional, el Tecnológico de Monterrey campus Guadalajara, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, la Universidad de Guadalajara y la Universidad Autónoma de Guanajuato.

Cada trabajo publicado en este número fue también presentado de manera virtual en las redes sociales del CENIDET, como parte de la 8ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, efectuada del 25 al 27 de mayo de 2022.

Finalmente, es importante destacar que en este número participaron en el Comité Técnico el Dr. Manuel Adam Medina, quien también fue como Coordinador General de la 8ª. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada; el Dr. Nimrod González Franco, la Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, el Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich, el Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda, el Dr. Rafel Campos Amezcua, el Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez; todos ellos profesores-investigadores del CENIDET a quienes se les agradece el compromiso y entrega para el desarrollo de esta actividad que promueve en estvudiantes de diversas licenciaturas del país el interés por la investigación y el desarrollo tecnológico.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora
Revista Académica Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada del TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

Ciencias Computacionales

Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dra. Andrea Magadan Salazar
Dr. Dante Mújica Vargas
Dr. Gerardo Reyes Salgado
Dr. Joaquín Pérez Ortega
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dr. Juan Gabriel González Serna
Dr. Máximo López Sánchez
Dr. Moisés González García
Dr. Noé Castro Sánchez
Dra. Olivia Fragoso Díaz
Dr. Raúl Pinto Elías
Dr. René Santaolaya Salgado
Dr. Juan Carlos Rojas Pérez
Dr. Javier Ortiz Hernández
Dr. Nimrod González Franco
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dra. María Yazmín Hernández Pérez
Dr. José Luis Ramírez Alcántara
Mtro. Victor Josue Ruíz Martínez

Ingeniería Electrónica

Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dr. Juan Reyes Reyes
Dra. Ma. Guadalupe López López
Dr. Enrique Quintero Mármol
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Dr. Manuel Adam Medina
Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Dr. Jarniel García Morales
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Jorge H. Calleja Gjumlich
Dr. Jesús D. Mina Antonio
Dr. Víctor H. Olivares Peregrino
Dra. Susana E. de León Aldaco
Dr. Jaime E. Arau Roffiel
Dr. Mario Ponce Silva
Dr. Carlos Aguilar Castillo

Ingeniería Mecánica

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Efraín Simá Moo
Dr. Eladio Martínez Rayón
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Jorge Colín Ocampo
Dr. José Jassón Flores Prieto
Dr. Miguel A. Chagolla Aranda
Dra. Claudia Cortés García
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Dr. Wilberth M. Alcocer Rosado
M.C. Víctor I. Rodríguez Reyes

Nuevas tendencias de la Ingeniería

Dr. Jesús Arce Landa
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez
Dr. Ma. Guadalupe López López
Dr. Mario Alejandro Gómez Jiménez
MC. Nayeli del Milagro Hernández Barba
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dr. Noe Alejandro Castro Sánchez
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Manuel Adam Medina
Dr. Cándido Manuel Juárez Pacheco
MC. José Luis Rodríguez Pliego

Innovación e Investigación Educativa

MC. Laura I. Catalán Godínez
Dra. Leticia Sánchez Lima
Lic. Elizabeth Astorga Martínez
Dr. Cándido M. Juárez Pacheco
MC. José Luis Rodríguez Pliego
Dr. Jarniel García Morales

Comité de Arbitraje Externo

Ciencias Computacionales

Dra. Nelva Nely Almanza Ortega
Tecnológico Nacional de México campus Tlalnepantla

Dra. Julia Yazmín Arana Llanes
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Dra. Mireya Tovar Vidal
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Osslan Osiris Vergara Villegas
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dra. Rocío Aldeco Pérez
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. María de los Ángeles Cosío León
Universidad Politécnica de Pachuca

Dra. Mirna Ariadna Muñoz Mata
CIMAT. Centro de Investigación en Matemáticas A.C.

Dra. Laura Cruz Reyes
TecNM campus Ciudad Madero

Dra. Eréndira Miriam Jiménez Hernández
Tecnológico Nacional de México campus Tlajomulco.

Dr. Jaime Iván López Veyna
Tecnológico Nacional de México campus Zacatecas

Dra. Elsa Ortega de Ávila
Tecnológico Nacional de México campus Zacatecas

Dra. María Guadalupe Balderrábano Saucedo
Tecnológico Nacional de México campus Zacatecas

Dr. Jaime Muñoz Arteaga
Universidad Autónoma de Aguascalientes

Dra. Gemma Bel Enguix
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Claudia Guadalupe Gómez Santillan
TecNM campus Ciudad Madero

Ingeniería Electrónica

Dr. Rubén Posada Gómez
Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo campus Orizaba

Dr. Vicente Borja Jaimes
Universidad TecMilenio

Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado
Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz

Dr. José Pastor Rodríguez Jarquin
TecNM campus Orizaba

Dr. Diego Alessis Carbot Rojas
Centro Nacional de Metrología

Dra. Betty Yolanda López Zapata
Universidad Politécnica de Chiapas

Dr. Ricardo Eliu Lozaya Ponce
TecNM campus Chihuahua

Dr. José Hugo Arellano Pérez
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Dr. Felipe de Jesús Torres del Carmen
Universidad de Guanajuato

Comité de Arbitraje Externo

Ingeniería Mecánica

Dr. Alfonso Campos Amezcua
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

Dra. Yuri Sara Hernández Demesa
Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas
Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
Instituto Tecnológico campus Pachuca

Dr. Luis Gerardo Trujillo Franco
Universidad Politécnica de Pachuca

Dr. Manuel de Jesús Palacios Gallegos
Universidad Politécnica de Chiapas

Dra. Mónica Patricia Mejía López
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

Dr. Ángel Tlatelpa Becerro
Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla-UAEM

Dr. Javier Uriarte Flores
Centro Nacional de Metrología

Dr. Orlando Montoya Márquez
Universidad Panamericana

Dra. Karla María Aguilar Castro
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Dr. Felipe Noh Pat
Universidad Autónoma de Campeche

Innovación e Investigación Educativa

MC. Elsa Ortega de Ávila
Dra. María Guadalupe Balderrabano Saucedo
Tecnológico Nacional de México campus Orizaba

MC. Belén Hernández Padilla
MC. Rosalinda del Carmen Navarro
MC. Sandra Elisa Coronado Fernández
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Nuevas tendencias de la Ingeniería

Dr. Héctor Ramón Azcaray Rivera
Tecnológico Nacional de México campus Oaxaca

Dra. Peggy Álvarez Gutiérrez
Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA 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
Dr. Manuel Adam Medina
Editores Asociados

Mtro. Víctor Josué Ruiz Martínez
Sitio Web

Pilar Janet López Zárate
Diseño de Portada

Fernanda Jared Gálvez Flores
Pilar Janet López Zárate
Diseño Editorial

Comité Técnico de los Artículos de la 8a Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Dr. Manuel Adam Medina
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Editores de los Artículos

Dr. Nimrod González Franco
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Editores Asociados
Ciencias Computacionales

Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Editores Asociados
Ingeniería Electrónica

Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Dr. Rafel Campos Amezcua
Editores Asociados
Ingeniería Mecánica

Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Administrador de la plataforma Easychair

CIENCIAS COMPUTACIONALES

Análisis de la caracterización de estilo de conducción en la prevención de accidentes por consumo de alcohol 15

Comparativa de Herramientas para Localizar Rostros Ocluidos 17

Caracterización de mejoras a K-Means del estado del arte y su aplicación a la solución de instancias de Ciencia de Datos 23

Mapeo Sistemático de Patrones de Seguridad en Microservicios 29

Metodología para determinar la granularidad de un Microservicio 35

Sistema de Ingesta de Datos Aplicando Modelos Pull y Push en el Área de la Salud 42

Un vistazo más profundo a la visualización de datos del seguimiento ocular 48

Métricas de Tolerancia a fallas: una taxonomía para sistemas Big Data 53

Breve revisión de la literatura sobre Modelos Predictivos para la Detección de Enfermedades Cardiovasculares 61

Aplicación móvil para una transición hacia la agricultura inteligente: caso de estudio limón persa 67

Algoritmos de flujo óptico en imágenes de baja resolución para navegación robótica 72

Reconocimiento del límite de grano en una aleación ternaria mediante solución de los eigenvalores en una metalografía 78

DevOps y su relación con la Ingeniería de Software: Un estudio bibliométrico 84

Desarrollo Experimental para la Detección de Caídas en Adultos Mayores Utilizando el Método Basado en Umbrales 91

Análisis y Modelo de Refactorización para disminuir la deuda técnica en Arquitecturas de Clases con más de una responsabilidad 97

Uso de IA en la gestión de movilidad en periodos de pandemia: una Revisión Sistemática de la Literatura 104

Atributos de calidad en estándares para recursos de aprendizaje 111

Etapas de Desarrollo del Repositorio Digital en el TecNM Campus Cuautla 117

Modelo para la detección de anomalías en el comportamiento de una persona 124

INGENIERÍA ELÉCTRONICA

Diseño de un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes superficiales para mini compresor 131

Simulación en 3D de Tomografía de Impedancia Eléctrica para la Detección de Tumores en la Mama con Interconexión en MATLAB y COMSOL. 137

Pruebas HALT de temperatura y humedad en un convertidor para aplicaciones fotovoltaicas 143

Arquitectura para la Implementación de Videojuego Frogger en una Tarjeta de Desarrollo con FPGA 150

Low-cost contact-less data input device for virtual reality applications using haptic fuzzy logic 157

Aproximación analítica para el cálculo del voltaje en el punto máximo de potencia de módulo fotovoltaico 163

Review on circuits for hyperthermia application 168

Control predictivo de un inversor multinivel de capacitores flotantes. 174

Comparación de metodologías de control multivariable para un aerogenerador 180

Análisis del tiempo muerto en la tensión de salida en el convertidor multinivel en cascada. 188

Diseño e implementación de compuerta lógica – analógica utilizando amplificadores operacionales. 195

Implementación en FPGA de cifrado en canal de comunicación, basado en autómatas celulares. 202

Desarrollo de un tapete sanitizador de calzado por medio de luz ultravioleta 207

Supervisión del sistema cardiovascular basado en observadores para sistemas con retardo 213

Diseño e Implementación en Hardware Embebido de Integradores de Orden Fraccionario 218

Sistema de automatización de control de acceso vehicular para un relleno sanitario intermunicipal 223

Diseño e Implementación de un prototipo de Termómetro Infrarrojo sin contacto de Largo Alcance conectado a redes Bluetooth Low Energy 228

INGENIERÍA MECÁNICA

Análisis dinámico de la condición inicial en modelo matemático de chimenea solar de un canal considerando un material masivo en la pared absorbente 235

Análisis del efecto del material de cambio de fase en un destilador solar para clima semidesértico 243

Enfoque novedoso para el análisis con dinámica de fluidos computacional de cargas aerodinámicas medias en heliostatos 249

Influencia del ranurado interno de un tubo receptor solar sobre la generación directa de vapor, deformación y esfuerzos térmicos 255

Efecto de la geometría trasera de un helióstato en reposo sobre las cargas aerodinámicas 261

Análisis experimental y numérico de disipadores pasivos de pared delgada 267

Estudio experimental de la descarga de flujo másico granular en contenedores 274

Construcción de una solución de referencia para la conducción de calor en un cilindro de dos losas considerando la resistencia térmica de contacto. 280

Mechanical characterization of spent- coffee-grounds briquettes 287

Evaluación del Desgaste de Prótesis de Cadera con Inserto Acetabular de UHMWPE y Cabeza Femoral de Acero 316L con Recubrimiento de DLC, por medio de Simulación de Elemento Finito. 294

Sistema de rehabilitacion “PES” MARK I 300

Estudio paramétrico de un muro Trombe con un material de cambio de fase: efecto de los materiales de construcción. 306

Linear micro-displacement sensor based on Mach-Zehnder fiber-optic interferometer with sections of tapered and in a reflective configuration 312

Efecto del Tamaño del Cultivo Sobre la Distribución de Temperaturas en un Invernadero por Efecto de los Sistemas de Calefacción 317

Diseño mejorado de una batería de flujo tipo redox de pequeña escala para el almacenamiento de energía. 321

INGENIERÍA MECÁNICA

Estudio numérico del desempeño de un aspa de geometría fractal para enfriar fluidos. 327

Diseño de una plataforma de simulación de movimiento sísmico 333

Diseño y fabricación de una máquina lavadora de nixtamal optimizando el proceso de elaboración para harina de tamal o tortilla 339

Diseño y fabricación de una máquina boleadora de masa para mejorar el proceso de elaboración de pan blanco y dulce (Boleatec) 346

Identificación de la incertidumbre en una matriz de datos de radiación solar de Xochitepec, Morelos 352

INVESTIGACIÓN E INOVACIÓN EDUCATIVA

Diseño de un Curso Online para la Autocapacitación de profesores en Competencias Técnicas Clave 359

Educación a distancia de emergencia en el posgrado de ingeniería: competencias digitales utilizadas por profesores 365

Modelos y aplicación de learning analytics que usa datos Escolares para predecir el rendimiento de alumnos 371

La Modelización como una Estrategia de Enseñanza: Ejemplo de la Caída de un Paracaidista en un Medio Resistivo 377

Herramienta Computacional de Bajo Costo para la Enseñanza de la Ingeniería de Control 384

Evaluación del desempeño docente desde la perspectiva de los estudiantes de Educación Superior 389

NUEVAS TENDENCIAS DE LA INGENIERÍA

Simulación térmica FE para obtener parámetros óptimos de soldadura en unión disímil TWIP-SS 304L 396

Aplicación de la técnica PSO a un modelo de Sistema fotovoltaico en modo isla e interconectado 401

Síntesis de nanopartículas semiconductoras de ZnO empleando Anemopsis califórnica 407

Extracción e identificación de compuestos activos de Estafiate (Artemisia ludoviciana) y Tepozán (Buddleja cordata) de la zona de Milpa Alta 412

Estudio de la fotodegradación de naranja de metilo variando la concentración de nanopartículas semiconductoras de ZnO 417

Efecto Inhibidor del Aloe Vera en Solución Alcalina que Simule los Poros del Concreto Reforzado 422

Comparative Study of CFD Software for Numerical Simulation of Multiphase Flows in Secondary Metallurgy 428

Degradación y transformación de residuos lignocelulosicos a azucares por hongos del género Aspergillus 434

Convertir las pérdidas agrícolas en productos deshidratados por medio de energía solar 439



CIENCIAS COMPUTACIONALES

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Análisis de la caracterización de estilo de conducción en la prevención de accidentes por consumo de alcohol

E. Sánchez Gutiérrez*. L.E. Torres Hernández*,
A. Salas Núñez*

**Departamento de Sistemas y Computación, Tecnológico Nacional de México/I.T. Zacatecas, Carretera, Panamericana entronque a Guadalajara s/n. La Escondida. Apartado Postal 245 C.P. 98000 Zacatecas, Zac.*

Resumen: México es el séptimo país que presenta mayor cantidad de muertes por accidentes de tránsito. La caracterización de estilos de conducción ha permitido mejorar el flujo vehicular y reducir la cantidad de accidentes en el camino, ocasionados principalmente por el conductor. Siendo la problemática de caracterización de estilo de conducción en conductores con consumo de alcohol un problema por ser abordado en México.

Palabras clave: Estilo de conducción; Comportamiento del conductor; Aprendizaje automático; Seguridad del conductor; Accidente de tráfico;

1. INTRODUCCIÓN

El término accidente (Campos & Huttich, 2014) ha dejado de ser considerado un evento fuera de control que se presente de manera súbita para ser definido como lesión no intencional, por lo cual puede ser previsible y prevenible.
Siendo la habilidad para conducir (Elander, 1993), la capacidad de rendimiento en ciertos aspectos como lo son: la capacidad de mantener el control del vehículo, procesar la información, responder de manera adaptativa a las dificultades en el camino, y por otra, el estilo de conducción, el cual es referente al comportamiento del conductor de un automóvil dada la manera habitual de conducción estable a lo largo del tiempo.

1.1 Problemática

La problemática en los accidentes automovilísticos a causa de consumo de alcohol en México (Gobierno del estado de México, 2013) se centra en la existencia de relación causal entre el consumo de alcohol y accidentes, ya que no se suelen seguir protocolos estandarizados para realizar alcoholimetrías(cuantifican el nivel de alcohol en el aliento), ocasionando una falsa seguridad en consumidores ocasionales de alcohol (principalmente jóvenes), al haber una relación directa entre la concentración de esta sustancia en pequeñas dosis, y la ocurrencia de siniestros viales, según el estudio realizado (Zador, 1991) en el Reino Unido y Canadá, el riesgo relativo de cada aumento porcentual de 0.02 en la concentración de alcohol en sangre de un conductor, duplica el riesgo de sufrir accidente fatal en comparación de un conductor con una concertación de alcohol igual a cero.
En México, el límite para poder conducir en estado etílico es de 0,04 CAS (concentración de alcohol en la sangre), sin embargo, el riesgo de una colisión en el tránsito comienza en niveles bajos de CAS y aumenta cuando el CAS del conductor es ≥ 0.02.
Por lo cual la prevención de accidentes en consumidores de alcohol en conductores ocasionales no ha sido abordada en la caracterización del conductor de modo que exista cierto grado de responsabilidad entre quienes consumen alcohol en pequeñas cantidades, y deben o quieren manejar un vehículo, al ser necesario desarrollar sistemas que supervisen las situaciones de funcionamiento de los conductores y alerten de cualquier condición insegura para prevenir accidentes automovilísticos.

1.2 Aplicación

Siendo (Marina Martinez, Heucke, Wang, Gao & Cao, 2018) el estilo de conducción un concepto que implica la existencia tanto de características estables, mentales y situacionales, los autores de trabajos previos (Dai, Teng, Bai, Shen & D. Xuan, 2010) nos indican ser un problema multidimensional, el cual puede ser abordado mediante dos enfoques, uno particular para cada conductor y un modelo general no intrusivo para caracterizar comportamientos anormales exhibidos por los conductores, así como para advertir a otros vehículos en la carretera.

Satisfaciendo los siguientes requisitos según autores (Dai, Teng, Bai, Shen & D. Xuan, 2010)

- Monitoreo en tiempo real.
- Confiable que funciona con precisión.
- No intrusivo.
- Bajo costo.
- Evaluación de aspectos estables, mentales y situacionales del contexto.

ISSN en trámite

Proponiendo según (Dai, Teng, Bai, Shen & D. Xuan, 2010) modelos basados en cuatro tipos de comportamientos de conducción: estado etílico, imprudente y fatiga mediante la combinación de contextos información sobre el conductor, el vehículo y el entorno, siendo el comportamiento en estado de ebriedad según (Shirazi and A. B. Rad, 2014) un conjunto de acciones como aceleración repentina, conducir sin mantener la posición correcta en el carril, conducir sin controlar la velocidad, ángulo del volante repentino.

Siendo el comportamiento del conductor un área bien documentada con algunas posibilidades inexploradas (Marina Martinez, Heucke, Wang, Gao & Cao, 2018), como lo es el consumo de alcohol en conductores ocasionales.

Esto se realiza con el fin de compilar e identificar estudios a partir de los cuales se podrían adoptar técnicas para futuras investigaciones.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación es comparativa tipo cuantitativa dado que se centrará en la recopilación y el análisis de resultados en trabajos previos con el fin de identificar técnicas de detección en base a características cuantificables como los son eficiencia, tiempo de respuesta y nivel de intrusión.

Los indicadores para comparar son:

- Algoritmo empleado.
- Tiempo de respuesta.
- Sensores empleados.
- Eficiencia del algoritmo empleado.
- Capacidad de evaluación de entorno situacional.
- Capacidad de evaluación de comportamiento del conductor.
- Nivel de intrusión.
- Aplicación.

Los trabajos para analizar comprenden trabajos relacionados a la caracterización de estilos de conducción del tipo normal, estado etílico, imprudente y fatiga, siendo estos relacionados con la conducta en estado de ebriedad

3. RESULTADOS

Se reconoce la característica de ser un problema multidimensional, cuyo factor decisivo se presume ser el tiempo real de la información y los patrones de comportamiento del conductor, por lo cual se evalúa este indicador en la comparación, siendo la relación entre el conductor y el control del vehículo y la sensibilidad del conductor a entornos de conducción complejos o situaciones (el clima, trafico) un factor decisivo en la eficiencia del algoritmo. Los usos algorítmicos difieren según el tipo de datos de entrada a los que los autores tuvieron acceso e hicieron uso tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los trabajos previos

Trabajo	Algoritmo empleado	Tiempo de respuesta	Sensores empleados	Evaluación de entorno situacional	Evaluación de comportamiento de conductor	Eficiencia del algoritmo	Nivel de intrusión	Aplicación
(Dai, Teng, Bai, Shen & D. Xuan, 2010) Mobile Phone Based Drunk Driving Detection	Reconocimiento de patrones	Tiempo real con respuesta rápida	Acelerómetro y Sensor de orientación.	No	Si	97.12%	Bajo	Perfil del conductor
(Shirazi & Rad, 2014) Detection of Intoxicated Drivers Using Online System Identification of Steering Behavior	Arimax	0.06 s	Angulo del volante.	No	Si	77%	Medio	Maniobra del conductor
(Zheng, & Hansen, 2016) Unsupervised Driving Performance Assessment using Free Positioned Smartphones in Vehicles	Support vector machines (SVM)	Tiempo real	Acelerómetro, Sensor de orientación y GPS.	No	Si	85%	Bajo	Comportamiento del conductor
(Cura, Kucuk, Ergen & Oksuzoglu, 2021) Driver Profiling Using Long Short Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Network	Redes neuronales artificiales	Tiempo real	Acelerómetro, GPS y consumo de combustible.	No	Si	95.3%	Bajo	Somnolencia
(Al-Sultan, Al-Bayatti & Zedan, 2013) Context-Aware Driver Behavior Detection System in Intelligent Transportation Systems	Redes Dinámicas Bayesiana.	Tiempo real.	GPS y sensores de velocidad.	Si	Si	No disponible	Alto	Comportamiento del conductor

Se identifica la utilización del reconocimiento de patrones para la distinción y el etiquetado de estilos de conducción, en la identificación individual del conductor y el estado de la carretera.

Las aproximaciones estadísticas se realizan en el reconocimiento de maniobras del conductor y modelado de la toma de decisiones del conductor.

Modelos Machine Learning Support Vector Machines son principalmente aplicados en la estimación del comportamiento de conducción.

Una técnica de redes dinámica bayesiana se aplica en entornos de detección para abordar el problema de los datos incompletos en entornos multidimensionales.

Las redes neuronales artificiales encuentran su aplicación en la detección de somnolencia.

ISSN en trámite

4. CONCLUSIONES

Los resultados sugieren la posibilidad de la detección de otros impedimentos, como somnolencia y distracción ya que existe una correlación con los estilos de conducción del tipo: imprudente y somnolencia en la conducción en estado etílico.

El objetivo de los algoritmos de detección es apoyar al conductor a un comportamiento más seguro mediante la detección de la conducta insegura.

Existe una relación entre el uso de las redes dinámicas bayesiana y la detección del comportamiento del conductor en estado etílico, siendo las redes dinámicas bayesianas el método más aproximado para tratar con datos inexactos como lo es la caracterización en estado etílico dado que el comportamiento del conductor es un problema de contexto incierto multidimensional.

Se reconoce la característica de ser un problema multidimensional sensible al contexto, cuyo factor decisivo se presume ser el tiempo real de la información y los patrones de comportamiento del conductor, siendo la relación entre el conductor y el control del vehículo y la sensibilidad del conductor a entornos de conducción complejos o situaciones (el clima, trafico) un factor decisivo en la eficiencia del algoritmo.

Como trabajo a futuro se prevé el desarrollo de una aplicación móvil para la detección de consumo de alcohol por medio del reconocimiento del estilo de conducción mediante el algoritmo de redes dinámicas bayesianas.

REFERENCIAS

Al-Sultan, S., Al-Bayatti, A.H., & Zedan, H., 2013. Context-Aware Driver Behavior Detection System in Intelligent Transportation Systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 62, 4264-4275.

Cura, A., Küçük, H., Ergen, E., & Öksüzoğlu, İ.B., 2021. Driver Profiling Using Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Network (CNN) Methods. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22, 6572-6582.

Campos & Huttich, R., 2014. Los accidentes de tránsito, problema de salud pública. Salud Pública De México, 15, 29_41.

Dai, J., Teng, J., Bai, X., Shen, Z., & Xuan, D., 2010. Mobile phone based drunk driving detection. 2010 4th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, 1-8.

Elander, J., West, R., & French, D., 1993. Behavioral correlates of individual differences in road-traffic crash risk: an examination method and findings. Psychological bulletin, 113(2), 279–294.

Gobierno del estado de México, Accidentes y alcoholismo, 2020. CEVECE.

Marina Martinez, C., Heucke, M., Wang, F., Gao, B., & Cao, D., 2018. Driving Style Recognition for Intelligent Vehicle Control and Advanced Driver Assistance: A Survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 19, 666-676.

Shirazi, M.M., & Rad, A.B., 2014. Detection of Intoxicated Drivers Using Online System Identification of Steering Behavior. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15, 1738-1747.

Zador P. L., 1991. Alcohol-related relative risk of fatal driver injuries in relation to driver age and sex. Journal of studies on alcohol, 52(4), 302–310.

Zheng, Y., & Hansen, J.L., 2016. Unsupervised driving performance assessment using free-positioned smartphones in vehicles. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1598-1603.

ISSN en trámite

Comparativa de Herramientas para Localizar Rostros Ocluidos

Jose Omar de Jesus Trujillo Quintero*, Andrea Magadán Salazar*,
Jonathan Villanueva Tavira, Raúl Pinto Elías***

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México*
{ m21ce028, andrea.ms, raul.pe}@cenidet.tecnm.mx
*** Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, México*
jonathanvillanueva@utez.edu.mx

Resumen: Derivado de la pandemia, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda utilizar cubrebocas como una forma de contribuir a la disminución de los contagios del virus causante del COVID-19; sin embargo, el uso del cubrebocas provoca que muchos sistemas biométricos faciales actuales sean ineficientes en torno a la localización y reconocimiento de personas al tener el rostro ocluido con el cubrebocas. En este artículo se presenta una comparación entre cuatro de los principales localizadores faciales más utilizados en los sistemas de identificación de personas con modelos pre entrenados, pero aplicados a la detección de rostros con oclusión causada por el uso de un cubrebocas en ambientes no controlados. Las herramientas que se evaluaron son Dlib, MTCNN, Detector Facial DNN y MediaPipe. Para la evaluación, se extrajo una muestra de imágenes de los conjuntos públicos MaskedFace-Net, MFDD, RMFRD, SMFRD y un pequeño conjunto propio con cambios de iluminación, rotación y diversos tipos de oclusión. Tras la experimentación se encontró que MediaPipe fue mejor obteniendo una precisión del 97.5%, una exactitud del 86.7% y un 92.9 % de f1 score en este trabajo.

Palabras Clave: Localización, Rostros Ocluidos, Evaluación, Detección de Cubrebocas, Visión Artificial.

1. INTRODUCCIÓN

Derivado de la pandemia generada por el virus causante del COVID-19 la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que todas las personas usen constantemente máscaras en público, ya que se ha demostrado que el uso de una máscara facial juega un papel importante en la prevención de la propagación del coronavirus (Organization & others, 2020). Por ello, se continúa trabajando en el desarrollo de sistemas de reconocimiento de personas considerando la oclusión del rostro para actualizar los sistemas biométricos de acceso y los sistemas de videovigilancia para la búsqueda e identificación de delincuentes.

El desarrollo de sistemas que consideran la oclusión del rostro se ha trabajado durante mucho tiempo como complemento del reconocimiento facial ya que los delincuentes aprovechan esta debilidad de los sistemas de reconocimiento facial para cometer robos y demás acciones en contra de la ley. Sin embargo, a pesar de los avances, uno de los principales retos sigue siendo localizar el rostro en ambientes no controlados con cambios en pose, escala, rotación e intensidad luminosa, considerando que aproximadamente la mitad del rostro está ocluida por el cubrebocas.

Con la finalidad de determinar que herramienta de localización de las existentes en la literatura tiene un mejor desempeño frente a las condiciones antes listadas primero se realizó una revisión del estado del arte encontrando que (Wang et al., 2020) utiliza la librería Dlib (Dlib, 2022) para desarrollar un sistema con el cual a partir de imágenes de los rostros sin oclusiones localiza la cara y agrega el cubrebocas de forma automática. Este dataset lo denominaron SMFRD y puede ser utilizado también para detectar la mascarilla (Wang et al., 2020). En el mismo artículo desarrollan un sistema que reporta un 95% de precisión con un modelo de reconocimiento facial enmáscarado de multigranularidad.

Debido al buen desempeño del aprendizaje profundo en diversas aplicaciones en Visión por Computadora, se han propuesto varios modelos para la detección del rostro. En el estado del arte existen varias propuestas que reportan altos rendimientos; por ejemplo, en (Nagrath et al., 2021) hacen uso del módulo DNN de OpenCV que contiene el modelo Single Shot Multibox Detector (SSD) (Liu et al., 2016) y ResNet-10 (Anisimov & Khanova, 2017) como la arquitectura principal para trabajar en un enfoque de tiempo real en la detección.

Otra propuesta para localizar rostros ocluidos es la implementación de arquitecturas CNN, por ejemplo, en (Wan & Chen, 2018) proponen un modelo de aprendizaje profundo, al cual denominaron MaskNet. Utilizaron el dataset CASIA-Webface (Yi et al., 2014) para el entrenamiento y el dataset AR (Martinez & Benavente, 1998) para la evaluación. Como procesamiento realizan el alineamiento y redimensionamiento de las imágenes del dataset con MTCNN (Zhang et al., 2016), se

ISSN en trámite

menciona que teniendo en cuenta únicamente rostros con gafas de sol obtuvieron una precisión del 90.9%.

En otra aplicación utilizando CNNs (J. Barrios, 2020) desarrollaron un algoritmo para la detección del uso de la mascarilla en tiempo real, que se puede implementar usando una PC y cámara web convencional, gracias a que utiliza herramientas tales como OpenCV, Keras y TensorFlow de Python. También se menciona que se utilizaron 3835 imágenes con mascarilla y sin mascarilla para entrenamiento. De forma similar (Cayetano, 2021) menciona que desarrollaron un sistema basado en Deep Learning para detectar el uso del cubrebocas de forma automática, también realizaron la creación de un dataset propio que consta de 700 imágenes con y sin cubrebocas mismas que fueron tomadas en los alrededores de donde habita el autor, tomando en cuenta diversidad de edad, tonalidades de piel y cambios de iluminación conforme a la hora en que fueron capturadas las imágenes.

La innovación de los sistemas de reconocimiento e identificación facial cada vez son mejores gracias a las inversiones y desarrollo que generan grandes empresas como Google quien implementó un marco de desarrollo denominado MediaPipe. Esta herramienta no solo se enfoca en la localización del rostro, sino que también tiene distintos tipos de soluciones para la localización del cuerpo humano, el cabello, etc., como se explica en (Kukil, 2022).

El objetivo del presente artículo es presentar una comparativa de las principales cuatro herramientas para la detección del rostro en una imagen o video en ambientes reales (no controlados), sobre todo considerando su comportamiento al no detectar puntos de referencia importantes como lo son la nariz, boca y barbilla. Es importante mencionar que se las herramientas seleccionadas se implementaron usando sus modelos pre entrenados para la detección del rostro.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se describen las herramientas implementadas para realizar la localización del rostro. En la sección 3 se presenta la experimentación realizada, en esta sección se muestra también la información de los conjuntos de imágenes considerados, las métricas utilizadas para evaluar el rendimiento de cada herramienta y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 4 se encuentran las conclusiones del artículo y los trabajos futuros a realizar.

2. HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN

Existen varias propuestas para la detección del rostro en una imagen, capaces de localizar todos los rostros presentes simultáneamente; sin embargo, se eligieron Dlib, MTCNN, Detector Facial DNN en OpenCV al ser las más utilizadas en la literatura y con respecto a MediaPipe es una herramienta relativamente nueva que ha alcanzado gran importancia gracias a sus múltiples aplicaciones en diversas plataformas, además de que es libre y de fácil acceso. Las cuatro herramientas presentan modelos pre entrenados para localizar el rostro con lo cual no requieren un entrenamiento adicional.

2.1 Dlib

Dlib (Dlib, 2022) es un conjunto de herramientas modernas que contiene algoritmos de aprendizaje automático para crear software complejo en el lenguaje C++, para resolver problemas del mundo real. Se utiliza tanto en la industria como en el mundo académico en una amplia gama de dominios y se puede usar en diversas plataformas, entre ellas en Python.

Dlib se integra del detector de rostros HOG + Linear SVM que es rápido y eficiente. Pero, debido a la naturaleza de cómo funciona el descriptor Histogram of Oriented Gradients (HOG), no es invariable a los cambios en la rotación y el ángulo de visión (Rosebrock, 2021).

Adicionalmente, la biblioteca Dlib cuenta con un detector de referencias faciales pre entrenado, que se utiliza para estimar la ubicación de 68 coordenadas (x, y) que se asignan a estructuras o elementos faciales, como se puede ver en la figura 1 (Rosebrock, 2017).

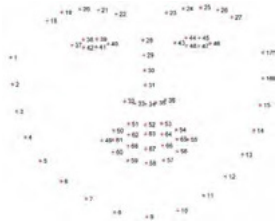


Fig 1 Plantilla de puntos faciales de Dlib (Rosebrock, 2017).

2.2 MTCNN

Combinan *cascaded CNNs by multi-task learning* (Zhang et al., 2016), es decir, implementan una estructura multitarea en cascada profunda haciendo uso de la correlación inherente entre ellas para tener un aumento en el rendimiento. Cada una de las capas en cascada consta de tres etapas de redes convolucionales profundas, cuidadosamente diseñadas, prediciendo los puntos de referencia del rostro de una forma gruesa a una forma fina. Además de detectar la ubicación del rostro, realiza la alineación de las partes importantes del rostro, etapa necesaria sobre todo en ambientes reales.

2.3 MediaPipe

MediaPipe Face Detection (MediaPipe, 2020) es una solución ultrarrápida de detección de rostros que viene con 6 puntos de referencia y compatibilidad con múltiples rostros. Se basa en BlazeFace (Bazarevsky et al., 2019), un detector de rostros liviano y de buen rendimiento diseñado para la inferencia de GPU móvil. El rendimiento en tiempo súper real del detector permite la estimación de puntos clave faciales en 3D (por

ISSN en trámite

ejemplo, MediaPipe Face Mesh que cuenta con 468 puntos faciales, como se puede observar en la figura 2).

También, gracias a que es una herramienta multiplataforma, el desarrollador puede configurar la aplicación creada con MediaPipe para administrar los recursos de manera eficiente (tanto para CPU como GPU) para lograr un rendimiento de baja latencia, para manejar la sincronización de datos de series temporales, así como de cuadros de audio y video, y para medir el rendimiento y el consumo de recursos (Lugaresi et al., 2019).

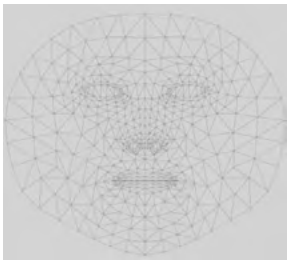


Fig 2 Plantilla de puntos faciales de MediaPipe[1].

2.4 Detector Facial DNN en OpenCV

DNN de OpenCV contiene el modelo Single Shot Multibox Detector (SSD) (Liu et al., 2016) y ResNet-10 (Anisimov & Khanova, 2017) como la arquitectura principal para trabajar en un enfoque de tiempo real en la detección del rostro (Nagrath et al., 2021).

DNN requiere de dos archivos de Caffe, los cuales son deploy.prototxt que define la arquitectura de la red y res10_300x300_ssd_iter_140000.caffemodel contiene los pesos de las capas (Kavitha et al., 2021), estos archivos se pueden descargar desde el repositorio de Github[2]

3. EXPERIMENTACIÓN

Para llevar a cabo la evaluación de las herramientas considerando variaciones reales del ambiente, se tomó una muestra de cuatro conjuntos de imágenes públicas. Estas imágenes presentan rostros cubiertos con cubrebocas, fondos complejos, diferentes tonos de piel, escala, perspectiva, edad, etnia y la presencia de uno o más rostros en la imagen. Los rostros pueden también contener accesorios como lentes, cabello, gorras, bufandas y obviamente cubrebocas de distintos colores. Además, se creó un conjunto propio con variaciones del tipo de cubrebocas y presencia de oclusión en el rostro. Los datasets se describen a continuación:

3.1 Datasets

MaskedFace-Net (Cabani et al., 2021): El dataset cuenta con más de 137,016 imágenes de rostros enmáscarados organizados en dos subconjuntos:

- El conjunto de rostros correctamente enmáscarados (cubriendo la nariz y boca) (denominado CMFD por sus siglas en inglés), que integra el 49% de las imágenes.
- El conjunto imágenes de rostros incorrectamente enmáscarados (denominado IMFD por sus siglas en inglés) corresponde al 51% de las imágenes.

Este dataset se construyó agregando un cubrebocas simulado usando el dataset FFHQ[3] por su gran variedad en términos de edad, etnia, punto de vista, iluminación y fondo de imagen.

Ejemplos de las imágenes se pueden ver en la figura 3:



Fig 3 Muestra de imágenes de los dos subconjuntos de MaskedFace-Net (Cabani et al., 2021).

MFDD (Wang et al., 2020): Conjunto denominado “Detección de rostros enmáscarados dataset” (MFDD por sus siglas en inglés). Contiene 24,771 imágenes de rostros enmáscarados las cuales son procedentes de internet y otros trabajos relacionados, por lo cual el dataset contiene una alta variabilidad.

RMFRD (Wang et al., 2020): Reconocimiento facial enmáscarado del mundo real dataset (RMFRD por sus siglas en inglés). Incluye 5,000 fotografías de 525 personas con máscaras y 90,000 imágenes de los mismos 525 sujetos sin máscaras. Se menciona que las imágenes contienen el rostro de vista frontal de figuras públicas, bajadas de recursos masivos de internet, por lo cual, las imágenes presentan alta variabilidad.

SMFRD (Wang et al., 2020): Dataset de reconocimiento de rostro enmáscarado simulado (SMFRD por sus siglas en inglés) construido a partir de los datasets LFW (Huang et al., 2008) y Webface (Yi et al., 2014) logrando construir un conjunto de rostros enmáscarados simulados de 500,000 imágenes de 10,000 sujetos que pueden ser usadas con su contraparte original sin mascarilla.

[1] https://github.com/google/mediapipe/blob/master/mediapipe/modules/face_geometry/data/canonical_face_model_uv_visualization.png

[2] https://github.com/alvareson/caffe_model_for_dace_detection

[3] https://github.com/NVlabs/ffhq-dataset

ISSN en trámite

En la figura 4 se pueden apreciar ejemplo de las imágenes de los datasets MFDD, RMFRD, SMFRD.



Fig 4 Ejemplo de imágenes datasets: MFDD en la primera fila, RMFRD en la segunda fila y SMFRD en la tercera fila (Wang et al., 2020).

Conjunto Propio: Consta de 60 imágenes adquiridas en diferentes días lo que provoca cambios de iluminación, rotación del rostro y diferentes tipos de oclusión, además de tener mayor variabilidad en el tipo del cubrebocas en condiciones reales, como se puede observar en la figura 5.



Fig 5 Muestra de imágenes dataset propio.

De los datasets mencionados se tomó una muestra de cada uno con un total de 130 imágenes[4]. El principal aspecto para evaluar es la robustez de las herramientas para localizar un rostro en la imagen cuando además de las condiciones antes señaladas, se tiene el rostro ocluido por cabello, lentes, gorra, además, aproximadamente la mitad del mismo ocluido por el uso del cubrebocas.

3.2 Métricas de evaluación

Para evaluar el desempeño de las herramientas consideradas en la localización del rostro se utilizan las métricas clásicas en el área de aprendizaje automático, en este caso son: exactitud, precisión, sensibilidad y F1-score. Dichas métricas utilizan como base la matriz de confusión. Cada columna de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada fila representa las instancias en la clase real como se observa en la figura 6. En términos prácticos, la matriz permite ver los aciertos y errores del modelo (J. I. Barrios, 2019).



Fig 6 Matriz de confusión (J. I. Barrios, 2019).

$$Exactitud = \frac{Vp + Vn}{(Vp + Fp + Fn + Vn)} \quad (1)$$

$$Precisión = \frac{Vp}{(Vp + Fp)} \quad (2)$$

$$Sensibilidad = \frac{Vp}{(Vp + Fn)} \quad (3)$$

$$f1\ score = 2 * \frac{Sensibilidad * Precisión}{(Sensibilidad + Precisión)} \quad (4)$$

3.3 Implementación de las herramientas

Las implementaciones se realizaron en Python 3.9, utilizando la librería Dlib, la librería MTCNN, la librería de imutils junto con Mediapipe y finalmente para DNN se requieren dos archivos adicionales, deploy.prototxt.txt que define la arquitectura y res10_300x300_ssd_iter_140000.caffemodel que define los pesos de la red pre entrenada correspondiente al modelo de Caffe. También se utiliza la librería de OpenCV para realizar la lectura y análisis de las imágenes.

Cada imagen de entrada es procesada con las cuatro herramientas. Cada una de ellas localiza el área potencial donde se encuentra el rostro y busca los puntos referenciales, cuando el algoritmo alcanza un cierto valor de certeza, dibuja un rectángulo y proporciona la información del rostro (posiciones) en detalle.

Dado que las imágenes consideradas de los distintos datasets tenían una dimensionalidad diferente entre sí, fue necesario llevar a cabo un redimensionamiento (normalización) de las mismas a 300x300 píxeles, esto ayuda a su visualización.

También se renombraron las imágenes para tener uniformidad en el nombre y que el sistema pueda leerlas y cargarlas de manera automática. No se llevó a cabo otro preprocesamiento de las mismas, ya que el objetivo del trabajo es comprobar la robustes de cada herramienta con los parámetros originales de la instalación de las mismas.

[4] https://drive.google.com/file/d/113GvyZVxXoBXlo6s0NhD7CY1EJJkSCE2/view?usp=sharing

ISSN en trámite

3.4 Pruebas

Como ya se mencionó, el objetivo de la experimentación es evaluar cuál de las principales y más utilizadas herramientas que se encuentran disponibles en la literatura para la detección y localización del rostro es más robusta en aplicaciones reales cuyas imágenes presenten rostros en entornos no controlados; es decir, con diferente escala, rotación, intensidad luminosa y sobre todo, evaluar su capacidad de tratar la oclusión causada por prendas o complementos del vestuario como pueden ser sombreros, gorras, cascos, lentes graduados, lentes de sol, cabello, incluso maquillaje, sin olvidar la oclusión del rostro ocasionada por el uso del cubrebocas.

3.5 Análisis de Resultados

En la tabla 1 se pueden observar los resultados obtenidos por cada herramienta, en las métricas consideradas.

Tabla 1 Resultados obtenidos.

Métrica	Herramienta			
	Dlib	DNN	MediaPipe	MTCNN
Exactitud	0.530	0.559	**0.867**	0.373
Precisión	**1.00**	0.564	0.975	**1.00**
Sensibilidad	0.530	**0.984**	**0.886**	0.373
F1 Score	0.693	0.718	**0.929**	0.543

Como se puede observar en la tabla 1, Dlib y MTCNN tienen buena precisión gracias a que localiza perfectamente todos los rostros frontales presentes en la imagen. La detección correcta la realizan aun ante la presencia del uso de cubrebocas, el uso de casco, presencia de cabello en la frente, uso de lentes graduados o de sol y uso de sombreros. No genera falsos positivos, incluso en imágenes sin presencia de rostros o en rostros que no logra detectar por condiciones debidas a cambios de iluminación, escala y una rotación media. Realmente, el factor principal que limita su desempeño es que ambas herramientas necesitan poder localizar ambos ojos de manera completa, por ello, obtienen un valor bajo en las métricas de exactitud, sensibilidad y F1 Score.

Por su parte, DNN y MediaPipe son las herramientas más eficientes que generan una buena respuesta ante las condiciones ambientales antes mencionadas, para la detección del rostro con oclusión obtienen 0.984 y 0.886 de sensibilidad respectivamente. La herramienta MediaPipe, tiene el mejor resultado de 0.867 de exactitud sobre las otras tres herramientas al detectar el rostro, aun cuando existe presencia de rotaciones que limitan la presencia completa de las partes del rostro.

En la figura 7 se pueden observar ejemplos de la detección realizada con las 4 herramientas analizadas, la imagen de la parte superior izquierda se obtuvo utilizando el detector facial Dlib, la imagen superior derecha se obtuvo con detector facial DNN, la imagen inferior izquierda se obtuvo con el detector MediaPipe y finalmente la imagen inferior derecha se obtuvo con el detector MTCNN.

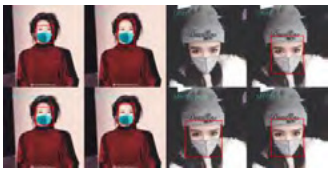


Fig 7 Muestra de los resultados obtenidos con cada detector facial.

Las cuatro herramientas trabajan bien ante cambios en la escala, localizando bien rostros presentes en regiones pequeñas y en regiones de tamaño medio (considerando la dimensión de toda la imagen). Sin embargo, MediaPipe suele tener problemas con rostros pequeños (más lejanos en la imagen) pero detecta mejor los rostros con una mayor apreciación de rotación. Por otra parte, la herramienta DNN genera falsos positivos si el rostro cubre casi por completo toda la región correspondiente de la imagen a analizar; es decir, localiza perfectamente el rostro en la imagen, pero también genera un rectángulo en la parte inferior derecha de la imagen, es decir, presenta falsos positivos, como se observa en la figura 8.

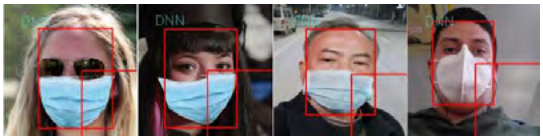


Fig 8 Visualización de Falsos positivos con DNN.

Finalmente, se observó que MediaPipe es más robusto en la detección de rostros con oclusiones, siendo el cubrebocas la mayor oclusión presente en la imagen, también es capaz de detectar el rostro en condiciones extremas de poca iluminación y de una mayor rotación. Además, su malla de 468 puntos faciales ayuda a localizar el rostro de manera general, así como a segmentar en detalle los diferentes elementos sin problema, lo que hace que la descripción del rostro se pueda utilizar en las diversas aplicaciones en los sistemas de reconocimiento.

4. CONCLUSIÓN

Derivado de la pandemia mundial por el COVID-19 los sistemas de reconocimiento facial tienen que ser actualizados siendo la primera etapa de los mismos la localización de rostros ocluidos en ambientes reales. En el presente artículo se revisaron cuatro herramientas gratuitas y públicas la cuales cuentan con un modelo pre entrenado para detectar y localizar el rostro en entornos reales. Además, de generar un nuevo datasets con rostros cubiertos con cubrebocas, lo que facilitando el desarrollo de nuevos sistemas.

Se puede concluir que Dlib es una de las herramientas más utilizada en la literatura al tener buenos resultados en la detección de rostros sin presencia de oclusión, pero tiene problemas con imágenes escasas de luminosidad y cuando no puede localizar ambos ojos. En el caso de DNN genera falsos positivos cuando el rostro cubre casi por completo la imagen; MTCNN no presenta la detección de falsos positivos; sin

ISSN en trámite

embargo, es el menos preciso en la detección del rostro cuando existe algún tipo de oclusión como el uso del cubrebocas. Por su parte MediaPipe es una herramienta relativamente nueva con la suficientemente robustez para realizar la tarea de detectar y localizar el rostro ocluidos y en entornos no controlados obteniendo una precisión del 97.5%, una exactitud del 86.7% y un 92.9 % de f1 score en este trabajo. Como trabajo a futuro se pretende comparar las herramientas analizadas en este artículo y otras herramientas que requieren un entrenamiento previo a su implementación.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para desarrollar mis estudios de maestría en el TecNM/CENIDET.

REFERENCIAS

Anisimov, D., & Khanova, T. (2017). Towards lightweight convolutional neural networks for object detection. *2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*, 1–8.

Barrios, J. (2020, June 7). *Algoritmo para la detección de mascarilla*. https://www.juanbarrios.com/algoritmo-para-la-deteccion-del-uso-de-la-mascarilla/

Barrios, J. I. (2019, June 26). *La matriz de confusión y sus métricas – Inteligencia Artificial –*. https://www.juanbarrios.com/la-matriz-de-confusion-y-sus-metricas/

Bazarevsky, V., Kartynnik, Y., Vakunov, A., Raveendran, K., & Grundmann, M. (2019). *BlazeFace: Sub-millisecond Neural Face Detection on Mobile GPUs*. 3–6. http://arxiv.org/abs/1907.05047

Cabani, A., Hammoudi, K., Benhabiles, H., & Melkemi, M. (2021). MaskedFace-Net – A dataset of correctly/incorrectly masked face images in the context of COVID-19. *Smart Health*, *19*, 100144. https://doi.org/10.1016/j.smhl.2020.100144

Cayetano, I. R. P. (2021). Detección automática de rostros con cubreboca o sin cubreboca para restringir el acceso a institución educativa. *Revista Aristas*, *8*(16), 154–160.

Dlib. (2022, January 24). *dlib C++ Library*. http://dlib.net/

Huang, G. B., Mattar, M., Berg, T., & Learned-Miller, E. (2008). Labeled faces in the wild: A database forstudying face recognition in unconstrained environments. *Workshop on Faces in'Real-Life'Images: Detection, Alignment, and Recognition*.

Kavitha, K. R., Vijayalakshmi, S., Annakkili, A., Aravindhan, T., & Jayasurya, K. (2021). Face Mask Detector Using Convolutional Neural Network. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 1979–1985.

Kukil. (2022, March 1). *Introducción a MediaPipe | AprenderOpenCV*. https://learnopencv.com/introduction-to-mediapipe/

Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., & Berg, A. C. (2016). Ssd: Single shot multibox detector. *European Conference on Computer Vision*, 21–37.

Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., Mcclanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C., Yong, M. G., Lee, J., Chang, W., Hua, W., Georg, M., & Grundmann, M. (2019). *MediaPipe : A Framework for Perceiving and Augmenting Reality*.

Martinez, A., & Benavente, R. (1998). The AR face database, CVC. *Copyright of Informatica (03505596)*.

MediaPipe. (2020). *Face Detection - mediapipe*. https://google.github.io/mediapipe/solutions/face_detection

Nagrath, P., Jain, R., Madan, A., Arora, R., Kataria, P., & Hemanth, J. (2021). SSDMNV2: A real time DNN-based face mask detection system using single shot multibox detector and MobileNetV2. *Sustainable Cities and Society*, *66*, 102692.

Organization, W. H., & others. (2020). *Advice on the use of masks in the context of COVID-19: interim guidance, 5 June 2020*.

Rosebrock, A. (2017, April 3). *Facial landmarks with dlib, OpenCV, and Python - PyImageSearch*. https://pyimagesearch.com/2017/04/03/facial-landmarks-dlib-opencv-python/

Rosebrock, A. (2021, April 19). *Detección de rostros con dlib (HOG y CNN) - PyImageSearch*. https://pyimagesearch.com/2021/04/19/face-detection-with-dlib-hog-and-cnn/

Wan, W., & Chen, J. (2018). Occlusion robust face recognition based on mask learning. *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP*, *2017-Septe*, 3795–3799. https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296992

Wang, Z., Wang, G., Huang, B., Xiong, Z., Hong, Q., Wu, H., Yi, P., Jiang, K., Wang, N., Pei, Y., Chen, H., Miao, Y., Huang, Z., & Liang, J. (2020). Masked face recognition dataset and application. *ArXiv*, 1–3.

Yi, D., Lei, Z., Liao, S., & Li, S. Z. (2014). Learning face representation from scratch. *ArXiv Preprint ArXiv:1411.7923*.

Zhang, K., Zhang, Z., Li, Z., & Qiao, Y. (2016). Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters*, *23*(10), 1499–1503.

ISSN en trámite

Caracterización de mejoras a K-Means del estado del arte y su aplicación a la solución de instancias de Ciencia de Datos

Joaquín Pérez Ortega* María Yasmin Hernández Pérez**
Carlos Fernando Moreno Calderón***

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, CP 62490
México (e-mail: jpo_cenidet@yahoo.com.mx).
** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, CP 62490
México (e-mail: yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx).
*** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, CP 62490
México (e-mail: carlos.moreno19ca@cenidet.edu.mx).

Abstract: Usar algoritmos de agrupación es muy común para la organización de datos en grupos, uno de ellos es K-Means, ya que es muy fácil de implementar e interpretar los resultados. La popularidad de este algoritmo, ha generado estudios para mejorar sus etapas, las cuales son: inicialización, clasificación, cálculo de centroides y convergencia. El problema principal que se aborda es que, al haber varias mejoras del algoritmo, se desconoce cuál de éstas es superior a las demás resolviendo un tipo de instancia. Para ello se realizó un estudio del estado del arte, para conocer las mejoras hechas a K-Means más relevantes, y con ello poder realizar la agrupación a instancias de Ciencia de Datos. Mediante experimentación computacional y conjuntos de datos reales, se identificaron instancias difíciles de resolver usando K-Means. Usando las mejoras hechas a K-Means se agruparon 37 conjuntos de datos reales, y se clasificaron las mejoras con las instancias que mejor resuelven al agruparlas.

Keywords: K-Means; Algoritmos de agrupamiento; Ciencia de Datos.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo, se observa día a día, un crecimiento constante de información Joaquín et al. (2018a). Es por ello que, la agrupación de datos se ha convertido en una necesidad. Existen métodos específicos para realizar la agrupación de datos, y es mediante el uso de algoritmos de agrupación. El algoritmo de agrupación *K-Means* es uno de ellos, es uno de los algoritmos más fáciles de implementar computacionalmente, pero su complejidad computacional, es una limitación que es presenta en el procesamiento. Joaquín et al. (2014a).

Debido a la problemática de la agrupación, se han realizado estudios enfocados en mejorar el algoritmo *K-Means* en sus diversas etapas. Las etapas del algoritmo son: inicialización, clasificación, cálculo de centroides y convergencia; algunos artículos enfocados en mejorar estas etapas son: Joaquín et al. (2014b) y su enfoque de solución a la problemática computacional es mejorar la eficiencia del algoritmo o su capacidad de solución de instancias de datos descrito en Joaquín et al. (2015).

En el presente artículo se presenta una caracterización de esas mejoras hechas al algoritmo estándar. El propósito es poner a prueba estas mejoras con instancias de Ciencia de Datos, mismas que pueden tener muchas dimensiones o grandes cantidades de datos David (2015). Dependiendo del tipo de instancia que mejor se resuelva con una mejora del algoritmo, será clasificada, teniendo con esto la caracterización de las mejoras hechas a *K-Means*.

Hoy en día, los problemas de agrupación han sido motivo de estudio para la realización de mejoras de algoritmos de agrupación como plantea Ming et al. (2011). Esta sección refiere a publicaciones en la cual se presentan algunas de esas mejoras realizadas al algoritmo estándar *K-Means*.

1.1 Trabajos relacionados

Principalmente, el interés está sobre aquellas mejoras puestas a prueba frente a otras variantes del algoritmo estándar, por lo cual una de ellas se presenta en Joaquín et al. (2018c), este articulo presenta una mejora de un heurística para solucionar instancias de gran tamaño, esto se soluciona mediante el cálculo de distancias de un objeto a dos centroides más cercanos, con la finalidad de encontrar una probabilidad de cambio de grupo. Finalmente, esta variante fue puesta a prueba frente a las variantes *Early classification*, *A-means* y *K-Means* estándar. Aunque esta variante fue mejorada en el paso de clasificación existen otras mejoras realizadas en el paso de convergencia o inicialización.

Una variante del algoritmo realizado en el paso de convergencia se define en Joaquín et al. (2018b). Es conveniente destacar que su aporte fue optimizar los tiempos de procesamiento y calidad de solución por parte del algoritmo *K-Means* estándar. Aunque

ISSN en trámite

algunas publicaciones muestran el aporte sobre optimización, el enfoque de éste artículo es encontrar cuáles de esas variantes pueden destacar en la optimización, un ejemplo puede ser lo que se demuestra en Saurabh y Manmohan (2012), en el cual se destacan experimentaciones de tiempo frente a los algoritmos *K-Medoid* y *K-Means*.

Una variante del algoritmo con métodos atípicos es demostrado en Xiaoli et al. (2014). En el cual se destaca una mejora al algortimo K-Means usando *MapReduce*, esto con la finalidad de obtener una mejor agrupación particional de los datos, para finalmente ponerlo a prueba frente a variantes del algoritmo denominadas *K-Means++* y *K-Means ||*. Además de mostrar variantes aplicadas a los pasos de clasificación y convergencia, también existen mayores aplicaciones en el paso de inicialización como se demuestra en Andrea (2017). Una de esas publicaciones es demostrada en Mohammed y Wesan (2012), en la cual se destaca un método de inicialización denominado *ElAgha initialization*, esta variante genera k puntos usando una técnica semialeatoria y demuestra que es conveniente su uso frente a métodos de inicialización aleatoria o inicialización manual.

Los experimentos descritos en estas publicaciones, se ha observado diversas instancias de prueba. Es conveniente mencionar que muchas de ellas se destacan en el área de *Big Data* como lo son en: Joaquín et al. (2014b, 2018a, 2018b, 2018c), Xiaoli et al. (2014); el área de Ciencia de Datos abarca parte de *Big Data* según David (2015), y visto en los experimentos de los artículos, se optó por realizar principalmente una taxonomía de las instancias recuperadas en ellas, para utilizarlas en esta investigación.

2. APLICACIÓN DE VARIANTES

Como se observó en la sección anterior, se conoce buena parte de los aportes realizados al algoritmo *K-Means*. En este apartado se explica de manera general aquellas variantes que se tomaron en cuenta para la aplicación sobre instancias de Ciencia de Datos.

2.1 Variante Fahim

El aporte al algoritmo *K-Means* realizado en *Fahim* et al. (2006) describe una comparación de distancias de objetos a centroides. Normalmente *K-Means* realiza la agrupación realizando la ubicación de centroides en medio de objetos, estos objetos tienen características similares entre ellos y características diferentes de objetos que pertenecen a otros grupos. La variante *Fahim* toma esas distancias para compararlas con futuras iteraciones, pero tiene una condición en la comparación: si la distancia que es calculada en la futura iteración es menor o igual que la distancia calculada en la iteración anterior, se cancelan los cálculos de distancias de ese objeto al respectivo centroide para futuras iteraciones y conserva su grupo.

Para la implementación de esta variante es necesario conocer la distancia que hay entre cada objeto hacia los centroides. Esta distancia se calcula en una función denominada *distance_new*(). La función *distance_new*() es similar a la función básica del algoritmo *K-Means* en la cual se realiza el cálculo de distancia para encontrar los objetos que se encuentren más cerca de un determinado centroide. Esta función se ejecuta para almacenar en una nueva variable las distancias de los objetos y posterior mente en futuras iteraciones realizar la comparación de las distancias.

En la ejecución de la función *distance_new*() se realiza primeramente, la comparación de las distancias calculadas. Es conveniente resaltar que ésta función se realiza a partir de la segunda iteración del algoritmo *K-Means*, y a partir de ello puede comparar distancias con iteraciones pasadas. El valor de la distancia anterior se almacena en una variable denominada *Pointdis*[i], y si la condición no se cumple el algoritmo continuará realizando la agrupación conforme los pasos que realiza *K-Means*.

Esta variante tiene buena aportación al algoritmo *K-Means*. Debido a ello se seleccionó por ser referenciada en diversos artículos, en los cuales realizan su implementación para pruebas determinadas a las respectivas investigaciones como lo son en Joaquín et al (2018b), Amjad et al. (2021), Peter et al. (2018).

2.2. Variante O-K-Means

El aporte realizado al algoritmo *K-Means* en Joaquín et al. (2018b) describe una modificación en el paso de convergencia del algoritmo. Esta modificación está basado una observación, en cada iteración que realiza el algoritmo *K-Means*, obtiene menor valor en la función objetivo, después de varias iteraciones, el valor de la función objetivo, no disminuye tan significativamente. En otras palabras puede converger, pero esto solo es posible si el número de objetos que cambian de grupo es menor a un umbral definido.

Esto se puede confirmar al conocer el valor de la función objetivo y el porcentaje de objetos que cambian de grupo en cada iteración. El algoritmo *K-Means* genera consumo en los recursos computacionales a pesar de que la ganancia en los valores es menor, pero se puede generar un balance entre el esfuerzo computacional y en los resultados obtenidos.

La variante *O-K-Means* realiza los tres primeros pasos del algoritmo *K-Means* estándar, la modificación realizada está en el paso de convergencia. Aquí es donde se describe la forma de encontrar el umbral para realizar la convergencia.

3. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

El proceso experimental se realizó usando índices comparativos. Esto con el fin de medir la diferencia que se obtiene entre las variantes y el algoritmo *K-Means* estándar. El propósito es conocer la ganancia o pérdida que obtienen las variantes en tiempo de ejecución o en la calidad de agrupación. Para ello se usó un equipo de cómputo con las siguientes características: procesador Intel Core i3-3220 CPU @ 3.30 GHz, 12 GB DDR3 de RAM, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GT 630 a 2 GB y sistema operativo Windows 10 Pro 64 bits. Además de usar el

ISSN en trámite

compilador "*gcc*" versión 7.4.0, esto con el fin de compilar código en lenguaje *C*.

3.1 Recopilación de instancias

Este proceso se llevó a cabo mediante la adquisición de instancias mayormente usadas en la literatura relacionada. Es conveniente mencionar que algunas de ellas no es posible tener acceso ya que no están disponibles en los repositorios reconocidos, mismos que se pueden tener acceso en UCI (2021), Keel (2021).

Tabla 1. Concentrado de instancias reales pequeñas.

ID	Instancia	n*d	Referencia
1	*Iris*	600	Lanlan et al. (2019)
2	*Appendicitis*	742	Saptarshi y Swagatam (2017)
3	*Newthyroid*	1,075	Saptarshi y Swagatam (2017)
4	*Glass identification*	1,926	Saptarshi y Swagatam (2017)
5	*Bupa*	2,070	Purva y Deepak (2015)
6	*wine*	2,327	Xv et al. (2015)
7	*Ecoli*	2,352	Emre et al. (2013)
8	*Balance scale*	2,500	Saptarshi y Swagatam (2017)
9	*Heart disease*	3,822	Emre et al. (2013)
10	*Cleveland*	3,952	Saptarshi y Swagatam (2017)
11	*Steel plates faults*	5,238	Emre et al. (2013)
12	*Pima*	6,144	Emre et al. (2013)
13	*Pima indians*	6,144	Emre et al. (2013)
14	*Breast cancer wisconsin*	6,291	Emre et al. (2013)
15	*Concrete data*	9,270	Emre et al. (2013)
16	*Cloud*	10,240	Emre et al. (2013)
17	*Spectf*	11,748	Emre et al. (2013)
18	*yeast*	11,872	Emre et al. (2013)
19	*Vehicle silhouettes*	15,228	Brian y Michael (2012)
20	*Abalone*	29,239	Fahim et al. (2006)
21	*Image segmentation*	43,890	Emre et al. (2013)
22	*Page blocks clasification*	54,730	Emre et al. (2013)
23	*Wine quality*	77,964	Emre et al. (2013)

La Tabla 1, muestra 23 instancias recopiladas en donde n representa la cantidad de objetos, d representa la cantidad de dimensiones que contiene la instancias y *n*d* representa el producto de los objetos y dimensiones. En el proceso de recopilación se observó que varias instancias se presentan en diferentes formatos, además de que algunas de ellas se distribuyen en más de un solo archivo, para realizar la agrupación se realizó pre-procesamiento de los datos para tener un solo formato y aplicarlo a los casos experimentales.

En la adquisición de las instancias se tuvieron dos observaciones: la primera consiste en que las instancias que son mayormente citadas presentan una cantidad no mayor a 100,000 en el producto de objetos y centroides (*n*d*).

La segunda observación consiste en que las instancias que son menos citadas presentan una cantidad mayor a 100,000 en el producto de objetos y centroides (*n*d*). Teniendo esto en cuenta se decidió por tener dos clasificaciones: la Tabla 1, contiene las instancias pequeñas recopiladas de la literatura relacionada y la Tabla 2, contiene las instancias grandes, la cual se presenta a continuación.

Tabla 2. Concentrado de instancias reales grandes.

ID	Instancia	n*d	Referencia
24	*Parkinsons*	123,375	Emre et al. (2013)
25	*Wall following*	147,312	Emre et al. (2013)
26	*Pen digits*	175,872	Emre et al. (2013)
27	*Magic gamma telescope*	190,200	Emre et al. (2013)
28	*Isolet*	226,113	Emre et al. (2013)
29	*Landsat satellite*	231,660	Emre et al. (2013)
30	*Letter recognition*	320,000	Mohammed y Wesam (2012)
31	*Optical digits*	359,680	Emre et al. (2013)
32	*Shuttle*	522,000	Emre et al. (2013)
33	*Person Activitis*	659,280	Emre et al. (2013)
34	*Musk clean*	1,095, 268	Emre et al. (2013)
35	*Corel image features*	5,928, 824	Emre et al. (2013)
36	*Bag of words*	11,131,260	Xiaoli et al. (2014)
37	*Covertype*	29,050,600	Emre et al. (2013)

3.2 Estructura experimental

El proceso experimental se realizó agrupando las instancias recopiladas, pero usando las variantes seleccionadas en el apartado (2), cabe mencionar que los centroides se seleccionaron de manera aleatoria en cada instancia y son los mismos al agrupar las instancias con las variantes seleccionadas. Se tomaron dos casos de experimentos que se explican a continuación:

1. En el experimento A se agrupó cada instancia usando las variantes *Fahim* y *O-K-Means*, además de seleccionar un valor de k=5, con el fin de observar la ventaja que tenga alguna variante en pérdida de calidad o reducción de tiempo.

2. En el experimento B se agrupó cada instancia usando las variantes *Fahim* y *O-K-Means*, además de seleccionar un valor de k=10, esto con la finalidad de observar cambios en las ventajas que tengan las variantes al duplicar grupos.

ISSN en trámite

Con base al diseño experimental se obtuvieron resultados de un total de 222 experimento. En particular se tomaron como base 37 instancias las cuales se resolvieron con tres algoritmos diferentes y con dos valores diferentes de *k*, uno de ellos es con k=5 y el otro k=10. Estos resultados se muestra a continuación.

3.3 Dominio de variantes en el tiempo

Para observar patrones de solución, se tomó en cuenta los resultados del algoritmo *K-Means* estándar y el uso de un índice comparativo (1) para conocer la diferencia que hay en el tiempo de procesamiento de las variantes y el algoritmo *K-Means* estándar.

$$Tv = \frac{100-(tv*100)}{t} \quad (1)$$

• *Tv* representa el porcentaje de mejora en el tiempo de la variante utilizada.

• *t* representa el tiempo de ejecución por parte del *algoritmo K-Means* estándar.

• *tv* representa el tiempo de ejecución de la variante utilizada.

La Figura 1, muestra el porcentaje de dominio que tienen las variantes en el tiempo sobre las instancias recopiladas. Como se puede observar en el experimento A, la variante *Fahim* obtuvo ventaja sobre 15 instancias (37.84%), mientras que la variante *O-K-Means* obtuvo ventaja sobre 22 instancias (62.16%). En el experimento B se puede observar la ventaja de la variante *Fahim* sobre 26 instancias (70.27%), mientras que la variante *O-K-Means* obtuvo ventaja en 11 instancias (29.73%). Observando el crecimiento de valor en k, la variante *Fahim* tiende a tener dominio en la reducción de tiempo sobre las instancias reales.

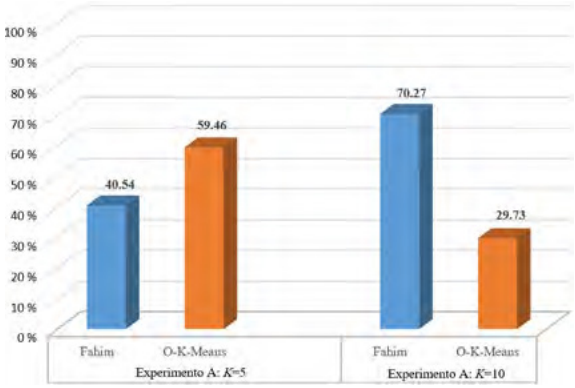


Fig. 1. *Porcentaje de dominio de las variantes en el tiempo, sobre los experimentos A y B*

3.4 Dominio de variantes en la calidad

De igual manera se aplicó un índice comparativo (2) para conocer la diferencia que hay en la calidad de agrupación que obtienen las variantes frente al algoritmo *K-Means* estándar; este apartado tiene la finalidad de conocer qué variante obtiene menor pérdida de calidad posible al realizar la agrupación de datos.

$$Zv = \frac{(Z-zv)}{Z} * 100 \quad (2)$$

• *Zv* representa el porcentaje de diferencia en calidad por parte de la variante aplicada.

• *Z* representa el valor de la función objetivo por el algoritmo K-Means estándar.

• *zv* representa el valor de la función objetivo de la variante aplicada.

La Figura 2, muestra el porcentaje de dominio que tienen las variantes al obtener menor pérdida de calidad sobre las instancias recopiladas. Se puede observar el porcentaje del total de instancias en las cuales *Fahim* (color azul) redujo menos la calidad a comparación de la variante *O-K-Means*. Estas se representan por 15 instancias (40.54%) en el experimento A y 16 instancias (43.24%) en el experimento B.

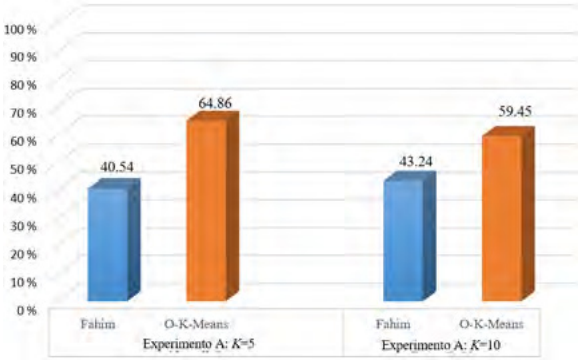


Fig. 2. *Porcentaje de dominio de las variantes en menor pérdida de calidad, sobre los experimentos A y B*

También se puede observar el porcentaje de instancias en las cuales la variante *O-K-Means* (color naranja) redujo la calidad en una cantidad menor a la de *Fahim*. Estas se representan por 24 instancias (64.86%) en el experimento A y 22 instancias (59.45%) en el experimento B. Demostrando así que la variante *O-K-Means* obtiene menor pérdida de calidad incluso cuando se duplican los valores de k.

3.5 Desempeño de variantes con instancias pequeñas

Debido a que se generalizó los resultados en los apartados anteriores, es conveniente conocer el desempeño de las variantes con cada instancia. Una característica destacable, es que las instancias pequeñas se presentan con diferentes cantidades de objetos y dimensiones. A continuación, se muestra una clasificación de las instancias pequeñas al ser agrupadas por las variantes *Fahim* y *O-K-Means*. En la Tabla 3, se presentan los mejores resultados de las variantes *Fahim* y *O-K-Means* al agrupar instancias pequeñas, donde se indica el beneficio que

ISSN en trámite

generan respecto a la reducción de tiempo y en obtener menor pérdida de calidad.

Tabla 3. Desempeño de variantes en el tiempo con instancias pequeñas.

ID	*K*	Tiempo	Porcentaje de tiempo	Calidad	Porcentaje de calidad
11	5	*Fahim*	26.20	*O-K-Means*	0.29
	10	*Fahim*	64.91	*O-K-Means*	0.31
15	5	*Fahim*	74.31	*O-K-Means*	-0.01
	10	*Fahim*	76.76	*O-K-Means*	-0.15
16	5	*O-K-Means*	47.49	*O-K-Means*	1.86
	10	*Fahim*	51.003	*O-K-Means*	-0.006
21	5	*O-K-Means*	64.005	*O-K-Means*	0.06
	10	*Fahim*	53.30	*O-K-Means*	-0.09
23	5	*Fahim*	85.32	*O-K-Means*	-0.52
	10	*Fahim*	47.22	*O-K-Means*	0.06

Como se muestran en la Tabla 3, la variante *Fahim* demostró mejor desempeño en reducción de tiempo. Sin embargo, la variante *O-K-Means*, presentó mejor desempeño en obtener menor pérdida de calidad. Finalmente, se concluye que es conveniente el uso de la variante *Fahim*, cuando se desea agrupar instancias pequeñas en el menor tiempo posible o usar la variante *O-K-Means* cuando se espera obtener la menor pérdida de calidad posible.

3.6 Desempeño de variantes con instancias grandes

Las instancias grandes muestran una estructura similar al de las instancias pequeñas, sin embargo, la cantidad de objetos y atributos es mucho mayor. A continuación, se presenta la Tabla 4, que muestra los mejores resultados de las variantes *Fahim* y *O-K-Means* al resolver instancias grandes.

Tabla 4. Desempeño de variantes en el tiempo con instancias grandes.

ID	K	Tiempo	Porcentaje de tiempo	Calidad	Porcentaje de calidad
26	5	*O-K-Means*	63.14	*Fahim*	0.0001
	10	*O-K-Means*	81.003	*Fahim*	0.0002
27	5	*Fahim*	16.03	*Fahim*	-0.001
	10	*Fahim*	62.76	*Fahim*	0.71
32	5	*O-K-Means*	36.67	*O-K-Means*	0.06
	10	*O-K-Means*	50.64	*Fahim*	0.57
37	5	*O-K-Means*	90.13	*O-K-Means*	0.09
	10	*O-K-Means*	93.57	*Fahim*	-0.903

Como se muestra en la Tabla 4, la variante *O-K-Means* demostró mejor desempeño en obtener menor tiempo de ejecución. Sin embargo, la variante *Fahim* demostró mejor desempeño en obtener menor pérdida de calidad. Finalmente, se concluye que es conveniente usar la variante *O-K-Means*, para agrupar instancias grandes en el menor tiempo posible o usar la variante *Fahim* cuando se desea obtener una agrupación con la menor pérdida de calidad posible.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se observó que es conveniente el uso de dos variantes del algoritmo *K-Means* para agrupar diferentes tipos de instancias. El propósito de la implementación fue conocer cuál de ellas es dominante al obtener menor tiempo de procesamiento y menor pérdida de calidad.

El aporte principal refiere a la agrupación con instancias pequeñas. Es conveniente mencionar que estas instancias son reales. Se recomienda la variante *Fahim* para agrupar instancias pequeñas en el menor tiempo posible, ya que con ella se obtuvo un dominio sobre el 78% de las instancias pequeñas.

El segundo aporte, refiere a la recomendación de la variante *O-K-Means*. Al comparar los resultados obtenidos entre ambas variantes se observó que *O-K-Means* destacó en obtener menor pérdida de calidad sobre el 80% de las instancias pequeñas.

Una importante característica sobre las instancias grandes, es la clasificación que se les dio a partir del valor $n*d = 100{,}000$. Ya que se observó que su agrupación genera mayor tiempo de procesamiento aplicando el algoritmo *K-Means*.

El tercer aporte refiere a la agrupación de las instancias grandes. De las variantes aplicadas, se observó que *O-K-Means* es dominante porque obtuvo menor tiempo de procesamiento, con un porcentaje de reducción de hasta 93.57%. Además, de que destacó sobre el 75% del total de las instancias grandes.

Para el caso de la agrupación de instancias grandes con menor pérdida de calidad posible, se recomienda el uso de la variante *Fahim*. Al comparar los resultados obtenidos, se observó que, la variante *Fahim*, obtuvo un porcentaje en la pérdida de calidad de agrupación de hasta -0.903%. Pero, mejoró la calidad de agrupación, con 0.71% en el mejor de los casos. Además, de que destacó sobre el 68% del total de las instancias grandes.

Al aplicar las variantes *Fahim* y *O-K-Means* del algoritmo *K-Means*, se demostró que es conveniente su uso para obtener mejores resultados en cuanto a reducción de tiempo y obtención de menor pérdida de calidad. Esto con el fin de aportar opciones a investigadores sobre qué variantes aplicar, cuando se requiera agrupar instancias como las que se usaron en el diseño de experimentos. Para dar continuidad a esta investigación, se espera el desarrollo de una variante híbrida que incluya el principio de la variante *K++*, para la solución de instancias de tipo *Big Data*. Además, para que la variante hibrida sea probada frente a variantes del algoritmo *K-Means* enfocados en la etapa de clasificación.

ISSN en trámite

REFERENCIAS

Amjad, F.A., Aqil, M.A., Muhammad, H. (2021). Improving the retrieval of arabic web search results using enhanced K-Means clustering algorithm. *Entropy (Basel, Switzerland)*, volume (23), pp. 1-19.

Andrea, V.V. (2017). Revisión del estado del arte de los algoritmos K-Means y sus mejoras. CENIDET.

Brian, K., Michael, I.J. (2012). Revisiting k-means: New algorithms via Bayesian Nonparametrics. 29 th International conference on machine learning. Edimburgo, Escocia.

David, D. (2015). 50 years of Data Science. Journal of Computational and Graphical Statics, volume (26), pp. 745-766.

Fahim, A.M., Salem, A.M., Torkey F.A., Ramadan, M.A., (2006). An efficient enhanced k-means clustering algorithm. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, volume (7), pp. 1626-1633.

Joaquín, P.O,, Miguel, H.R., Nelva, A.O., Noé C.S., Vitervo, L., Hugo, E., Adriana, M. (2014a). Mejora del algoritmo K-Means mediante una meta-heurística orientada a la reducción de su complejidad computacional. [Presentación de paper]. Encuentro Nacional de Computación (ENC), del Taller sobre Aspectos Algorítmicos de Aplicaciones y Sistemas Computacionales (AAASC), Ocotlán, México.

Joaquín, P.O., Rodolfo, P.R., Miguel, H.R., Nelva, A.O., Ocotlán, D.P,, René, S., Vitervo, C. (2014b). An Improvement to the K-means Algorithm Oriented to Big Data. International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2014 (ICNAAM-2014). Rodas, Grecia.

Joaquín, P.O., Rodolfo. P., Victor, O., Miguel, H., Jorge, R., Alicia, M., Nelva, A., Moisés, G. (2015). Optimization of the K-means algorithm for the solution of high dimensional instances. International conference of numerical analisys and applied mathematics 2015, Rodas, Grecia.

Joaquín, P.O., Miguel, H.R., Noé, C.S., Rodolfo, P.R., Ocotlán, D.P,, Víctor, O.P,, Nelva, A.O. (2018a). Una heurística eficiente aplicada al algoritmo K-means para el agrupamiento de grandes instancias altamente agrupadas. Computación y sistemas, volumen (22), pp 607-619.

Joaquín, P.O., Nelva, A. O., David, R. (2018b). Balancing effort and benefit of K-means clustering algorithms in Big Data realms. PLOS ONE, volume (13), pp. 1-19.

Joaquín, P.O., Nelva. A., Jorge, A., Rodolfo, P., Socorro, S., José, R., Alicia, M. (2018c). A-means: improving the cluster assignment phase of k-means for Big Data. International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, volume (9), pp. 3-10.

Keel-dataset. Data set repository. https://sci2s.ugr.es/keel/datasets.php.

Lanlan, Z., Jinshuai, Q., Minghu, G., Meina, Z. (2019). Improvement of K-means algorithm based on density. IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. Chongqing China.

Ming, C.C., Chun, W.T., Chu, S.Y. (2011). A Time-Efficient pattern reduction algorithm for k-means clustering. Information sciences, volume (4), pp. 716-731.

Mohammed, E.A., Wesam, M.A. (2012). Efficient and fast initialization algorithm for k-means clustering. Intelligent Systems and Applications, volume (4), pp. 21-31.

Peter, O.O., Fulufhelo, N., Tshilidzi, M. (2018). k-Means-Lite: real time clustering for large datasets. 5th International Conference on Soft Computing and Machine Intelligence. Nairobi, Kenya.

Purva, R., Deepak, S. (2015). Analysis and performance improvement of K-means clustering in big data environment. International Conference on Communication Networks (ICCN). Gwalior, India.

Saptarshi, C., Swagatam, D. (2017). k−means Clustering with a New divergence-based Distance Metric: Convergence and Performance Analysis. Pattern Recognition Letters, volume (100), pp. 67-73.

Emre, C., Hassan, A.K., Patricio, A.V. (2013). A comparative study of efficient initialization methods for the k-means clustering algorithm. Expert Systems with Applications, volumen (40), pp. 200-210.

Saurabh, S., Manmohan, S. (2012). Comparison of a time efficient modified K-mean algorithm with K-Mean and K-Medoid algorithm. International Conference on Communication Systems and Network Technologies, pp. 435-437.

UCI Repository of Machine Learning Databases. https://archive.ics.uci. edu/ml/datasets.php.

Xiaoli, C., Pingfei, Z., Xin, Y., Keqiu, L., Changqing, J. (2014). optimized big data K-means clustering using MapReduce. The Journal of Supercomputing, volume (70), pp. 1249-1259.

Xv, L., Qian, L., Yi, Z. (2015). Density K-means: A new algorithm for centers initialization for K-means. 6th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), Beijing, China.

ISSN en trámite

Mapeo Sistemático de Patrones de Seguridad en Microservicios

Ing. Juana Victoria Penagos Sánchez*. Dr. Juan Carlos Rojas Pérez*.
Dr. Olivia Fragoso Diaz*. Mtro. Mario guillen Rodriguez*.

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, CP 62490, México.*
(e-mails: m20ce068, juan .rp, olivia.fd, mario.gr@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: Los microservicios son una tecnología relativamente nueva para diseñar aplicaciones de software como conjuntos de servicios escalables, modulares y centrados en el cliente, que se pueden desplegar de forma independiente. Sin embargo, al ser una tecnología reciente también presenta algunos problemas como la seguridad, área de investigación en la que se han propuesto algunas soluciones, aunque no acordes con la arquitectura de microservicios. En este trabajo se presenta un estudio de mapeo sistemático, cuyo objetivo se centra en evidenciar el estado actual del problema de la seguridad en microservicios. El mapeo sistemático se realizó entre 2011 y 2021 y se identificaron 51 artículos relevantes, de los cuales se seleccionaron 9 artículos finales en base a criterios de clasificación. Se pudo observar, que los patrones en microservicios y seguridad son aún temas nuevos que están en desarrollo, se han reutilizado patrones derivados de varias arquitecturas, los cuales se han modifican para los microservicios y no en todos los casos se adaptan por sí mismos. Dicho lo anterior, se identificaron 49 patrones que son aplicados a diferentes arquitecturas de software y algunos utilizan atributos de calidad para adaptarse a los microservicios.

Palabras Clave: Microservicio, Patrones, Seguridad

.

1.INTRODUCCIÓN

El término "Arquitectura de Microservicios" ha surgido en los últimos años para describir una forma particular de diseñar aplicaciones de software como conjuntos de servicios que se implementan de forma independiente. Aunque no existe una definición exacta de este estilo arquitectónico, existen algunas características comunes relacionadas con la organización, las capacidades empresariales, la implementación automatizada, la inteligencia en los puntos finales y el control descentralizado de idiomas y datos. Martin, F. (2014). Los sistemas basados en microservicios son un estilo arquitectónico que concibe los sistemas como conjuntos de servicios modulares, centrados en el cliente, independientes y escalables Astudillo, M. G. (2018). Sin embargo, a pesar de las ventajas que ofrece la adopción de arquitecturas de microservicios al desarrollo de sistemas complejos, la seguridad es uno de los serios desafíos que se deben abordar. Actualmente no hay forma de encontrar vulnerabilidades en microservicios y lograr un resultado efectivo Chondamrongkul Nacha & Jing Sun, a. I. (2020). En este trabajo se presenta un MS (Systematic Mapping) sobre patrones de seguridad utilizados en microservicios. El objetivo principal de este MS fue obtener un panorama sobre el estado actual de patrones de seguridad en microservicios y analizar cómo se están aplicando. Se recopilaron 51 artículos siguiendo el modelo de Petersen Kai, e. a. (2008) a través de diferentes motores de búsquedas. Después de un proceso de depuración se obtuvieron 9 artículos que abordan el problema de la seguridad a través de patrones de diseño. De acuerdo a la información obtenida de los artículos finales, se obtuvieron 49 patrones que se implementan en diversas arquitecturas y se han aplicado a microservicios. En este análisis se realizó una clasificación de patrones aplicados a la seguridad en microservicios. Los patrones en microservicios y seguridad aún son temas nuevos y en desarrollo. Cabe señalar que no existe una definición exacta de microservicio; dado que cada autor tiene una perspectiva diferente y brinda su punto de vista en cada trabajo, a su vez se tiene noción de la aplicación de patrones de acuerdo a las experiencias de arquitecturas anteriores. Algunos artículos refieren hacer comparaciones con SOA (Service Oriented Architecture), pero no en todos los casos estas soluciones se adaptan por si solas, sino que recurren a la utilización de modelos de calidad del software y así resarcir el problema de seguridad de manera provisional.

2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En esta sección se presentan los detalles del protocolo adoptado para la realización del estudio de MS, siguiendo las pautas de Petersen Kai, e. a. (2008), las cuales se muestran en la Figura 1.

ISSN en trámite

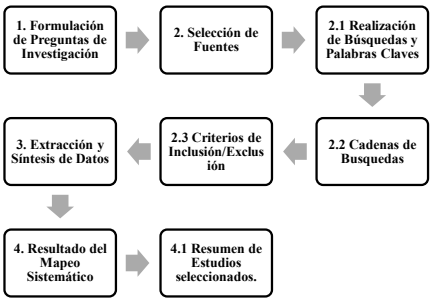


Figura 1. Proceso del mapeo sistemático adaptado de (Petersen Kai, e. a. (2008).

2.1. Formulación de Preguntas de Investigación.

El objetivo principal de este MS fue obtener un panorama sobre el estado actual de los patrones de seguridad en microservicios y analizar cómo se están aplicando, para esto se plantearon tres preguntas de investigación:

RQ1 ¿Qué patrones de seguridad se están aplicando a nivel diseño en microservicios?

El objetivo es definir y evidenciar la existencia de patrones de seguridad que sean aplicables en el diseño de microservicios.

RQ2 ¿a nivel desarrollo en micro servicios, Qué patrones de seguridad se están aplicando?

El objetivo es evidenciar la existencia de patrones de seguridad aplicados a nivel desarrollo de microservicios.

RQ3 ¿Qué métricas existen para medir los patrones de seguridad en microservicios?

El objetivo es conocer las métricas que existen o están adaptadas para la medición de patrones de seguridad en microservicios.

2.2. Selección de Fuentes.

Las fuentes de información digitales en línea consultadas para este MS se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Selección de fuentes

Fuente	Dirección Url
IEEEXplore	https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp
Elsevier	https://www.elsevier.com/es-mx
ACM Digital	https://dl.acm.org/
Springer	https://link.springer.com/
Google Scholar	https://scholar.google.es/schhp?hl=es

2.3. Realización de Búsquedas y Palabras Clave

Las cadenas de búsquedas fueron diseñadas de acuerdo con las preguntas de investigación previamente mencionadas, utilizando palabras clave. De acuerdo al objetivo de este MS y a las preguntas de investigación se obtuvieron las palabras claves: patrones, microservicios, métricas, seguridad, diseño, servicios.

Las cadenas de búsquedas fueron ejecutadas en cada una de las fuentes de información listadas en la Tabla 1.

2.4. Cadena de Búsquedas

Se efectuó una búsqueda inicial con respecto a mapeos sistemáticos orientados a patrones y seguridad en microservicios, la cual no arrojó resultados específicos. A continuación, se muestran las cadenas generales de búsqueda en relación a las preguntas de investigación antes mencionadas. Estas cadenas fueron modificadas de acuerdo a cada fuente digital:

Cadena de Búsqueda1. Security patterns applied to the microservices design level **or** security patterns adapted to the microservices design level **or** security patterns in microservices **or** application of security patterns in microservices.

Cadena de Búsqueda2. Security patterns applied at the microservices development level **or** security patterns adapted to the microservices development level **or** security patterns in microservices **or** security in microservices **or** security in microservices application of patterns.

Cadena de Búsqueda3. Existing metrics to measure security patterns in microservices **or** adapted metrics to measure security patterns in microservices **or** application of security metrics with patterns in microservices **or** security metrics and patterns in microservices.

En estas búsquedas se encontraron artículos relacionados con microservicios de manera general y en relación a los patrones en otras arquitecturas y diferentes aplicaciones.

2.5. Criterios de Inclusión y Exclusión

El intervalo de fechas de búsqueda se definió a partir del 2011, Pendleton, (2016), ya que no había un consenso sobre microservicios previo a este año, y este se amplió hasta el 2021. En la Tabla 2 muestran los criterios de inclusión y exclusión, los cuales fueron utilizados para filtrar los resultados obtenidos de las cadenas de búsqueda.

ISSN en trámite

Tabla 2. Criterios de Inclusión y Exclusión.

ID	Criterios
	Inclusión
I1	Artículos publicados del 2011-2021.
I2	Artículos publicados en idioma inglés.
I3	Artículos que aborden el problema de patrones de seguridad en microservicios.
I4	Artículos que apliquen patrones de seguridad
I5	Artículos que realicen mapeos sistemáticos aplicando o adaptando patrones de seguridad en microservicios.
	Exclusión
E1	Artículos incompletos.
E2	Documentos que estén en formatos no adecuados (Noticias, presentaciones, Tesis, tesinas, patentes).
E3	Artículos que mencionan el término de seguridad en Microservicios, pero no es el tema principal abordado por el artículo.
E4	Trabajos que no se relacionan con patrones de seguridad en microservicios.

2.6. Extracción y Síntesis de Datos

Según Paulo Anselmo da Mota Silveira Neto, I. d. (2010), sugiere la exploración de los documentos y realizar la lectura completa de los artículos, así como responder las preguntas planteadas, esto debido a que en muchas ocasiones el título y el resumen no indican nada relevante, por ende, no responde a las interrogantes. Una vez aplicados los criterios de inclusión y exclusión se observó que existen pocos trabajos relacionados a los patrones de seguridad en microservicios. Para completar el Mapeo Sistemático se clasificaron los trabajos finales de acuerdo a Wieringa Roel, M. N. (2006), el cual se define de los siguientes criterios de clasificación: investigación exploratoria, investigación explicativa, investigación aplicativa, artículos teóricos y artículos de revisión.

3. RESULTADOS DEL MAPEO SISTEMÁTICO

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del MS que responde las tres preguntas de investigación.

3.1. Resumen de Trabajos finales Seleccionados

En el trabajo de Astudillo, M. G. (2018), se explora qué patrones arquitectónicos se utilizan en sistemas reales de código abierto basados en microservicios, sometiendo treinta proyectos a una revisión exhaustiva de código y diseño con criterios múltiples.

Barabanov Alexander, M. D. (2020), realiza un análisis de artículos de investigación sobre los patrones de autorización, así como autentificación y su aplicabilidad en función al entorno, tomando en cuenta ventajas y desventajas.

El trabajo de Bogner, J. F. (2021), presenta una revisión de la literatura gris y un sistema de entrevistas para obtener un análisis de descentralización y estandarización como los principios arquitectónicos para garantizar la coherencia y automatización con el uso de herramientas, métricas y patrones para la integración de microservicios.

Por otro lado, Stocke Mirko, e. a. (2018), cubre el espacio de diseño de API (Application Programming Interface) proponiendo cinco patrones para la calidad de interfaz orientadas a la eficiencia, seguridad y gestión.

Torkura Kennedy A, e. a. (2017), aborda los problemas de seguridad rediseñando y desplegando una aplicación SecaaS (Security as a Service) monolítica utilizando patrones de diseño nativos de la nube. Este prototipo puede manejar eficazmente aplicaciones SecaaS.

En su libro Richardson, C. (2019), se enfoca en explicar los patrones de arquitectura de microservicios, recopila, cataloga y explica 44 formas que resuelven problemas como lo son descomposición de servicios, la gestión de transacciones, las consultas y la comunicación entre servicios.

En el trabajo de Barabanov Alexander, M. D. (2021), modelan las amenazas de la seguridad; identificando las mejores prácticas en cuanto a patrones de auditoría de registros y su aplicación en función a entornos; proporcionando un modelo de amenazas para el patrón de arquitecturas basados en microservicios.

En el artículo de Rudrabhatla, C. K. (2020), se conceptualizan elementos de la seguridad de MSA (Microservice Architecture), enfoca las necesidades de seguridad y protección de servicios distribuidos.

Tihomir Tenev, D. B. (2018), realiza un análisis de vulnerabilidades utilizando STRIDE (Spoofing, Tampering, Repudiation, Information Disclosure, Denial of Service, Elevation of Privilege), que es un acrónimo que resume 6 categorías de amenazas, proporciona recomendaciones de patrones de seguridad adecuados a la función del escenario para mitigar la amenaza de seguridad como la divulgación o la manipulación de esta.

3.2. Resultado del MS

El proceso de búsqueda de información arrojo un total de 51 artículos publicados. La Figura 2 muestra la distribución de búsquedas por fuentes de información.

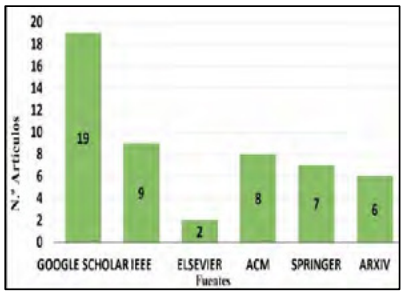


Figura 2. Resultados de búsquedas por fuente digital

ISSN en trámite

Del total de 51 artículos, se eliminaron 8 duplicados, reduciendo el número a 43 trabajos; de estos se realizó la selección de los títulos y resúmenes, de los cuales se excluyeron 17, por su irrelevancia con el tema de investigación dando un total de 26; una vez realizado esto se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión se desecharon 17. El total de artículos finales fueron 9, para llevar a cabo la investigación, todo este proceso se puede apreciar en la Figura 3.

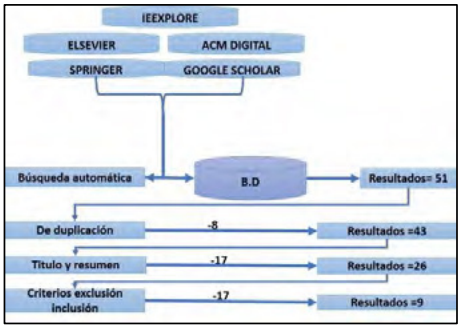


Figura 3. Proceso General de Selección de artículos.

En la Tabla 3 se muestran los artículos finales seleccionados. Cabe resaltar que todos estos trabajos utilizan patrones de seguridad, definidos en otras arquitecturas, los cuales son aplicados a microservicios. No se encontró algún trabajo específico en seguridad.

Tabla 3. Publicaciones seleccionadas

ID	Nombre del Articulo	Año	Preguntas	Tipo
Astudillo, M. G. (2018)	Actual Use of Architectural Patterns in Microservices-based Open-Source Projects	2019	RQ2	C
Barabanov Alexander, M. D. (2020)	Authentication and authorization in microservice-based systems: survey of architecture patterns	2020	RQ1	A
Bogner, J. F. (2021)	Industry practices and challenges for the evolvability assurance of microservices	2021	RQ3	J
Stocke Mirko, e. a. (2018)	Interface Quality Patterns Communicating and Improving the Quality of Microservices APIs	2018	RQ1	C
Torkura Kennedy A, e. a. (2017)	Leveraging Cloud Native Design Patterns for Security-as-a-Service Applications	2017	RQ3	C
Richardson, C. (2019)	Microservices Patterns	2019	RQ3	L
Barabanov Alexander, M. D. (2021)	Security audit logging in microservice-based systems: survey of architecture patterns	2019	RQ1	J
Rudrabhatla, C. K. (2020).	Security Design Patterns in Distributed Microservice Architecture	2020	RQ1	J
Tihomir Tenev, D. B. (2018)	Security patterns for microservices located on different vendors	2018	RQ1	J

C: Conferencia, J: Revista, A: Articulo, S: Simposio, L: Libro

En la Figura 4 se muestran las preguntas de investigación y el total de los estudios que dan respuesta a estas, mostrados en porcentajes: RQ1 56%, RQ2 11% y para RQ3 un 33%.

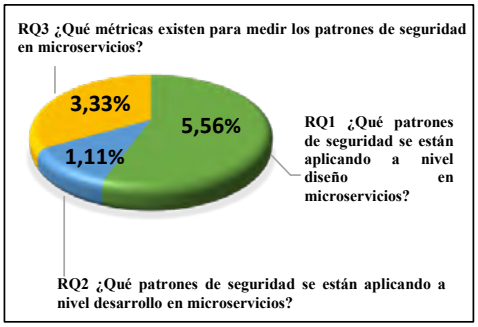


Figura 4. Artículos relacionados a patrones en microservicios.

3.3. Análisis de las preguntas de Investigación

RQ1. Para responder a esta pregunta se encontraron 5 artículos relacionados, donde se muestran Stocke Mirko, e. a. (2018), cinco patrones que se centran en la calidad para la seguridad de una API; Barabanov Alexander, M. D. (2021), realiza un análisis para la mejoras en los registros de patrones de auditoría; Tihomir Tenev, D. B. (2018), conceptualiza la utilización de patrones para la implementación de aplicaciones analiza vulnerabilidades utilizando STRIDE y muestra recomendaciones de patrones; Barabanov Alexander, M. D. (2020), menciona las mejores acciones para la aplicación, descentralización, ventajas y recomendaciones de los patrones; Rudrabhatla, C. K. (2020),se enfoca en la protección de los sistemas distribuidos conceptualizando elementos de MSA.

RQ2. Muestra un estudio de código abierto para la aplicación de patrones basados en SOA y que se aplican a microservicios Astudillo, M. G. (2018).

RQ3. Para responder a esta pregunta se encontraron 3 artículos; el primero Torkura Kennedy A, e. a. (2017), habla sobre aplicaciones nativas en la nube y aplicación de métricas en tiempo real; el segundo Bogner, J. F. (2021), menciona la comparación de las métricas en base a la literatura gris y encuestas de métricas para la arquitectura y el código; el tercero Richardson, C. (2019), muestras métricas de monitorización y alerta, todas relacionadas a JWT (JSON Web Token).

En la Tabla 4 se presenta una clasificación de patrones en seguridad de acuerdo con los estudios finales analizados, los cuales se clasificaron por autentificación y autorización, así como estándares de autentificación mostrando los mecanismos que se utilizan en los microservicios.

Tabla 4. Clasificación de Patrones para Microservicios

ISSN en trámite

Patrones de Seguridad	Autentificación y Autorización	• Modelo descentralizado • Patrón centralizado con un único punto de decisión política • Patrón de registro • Clave Api • Utilizar una estructura de datos firmada por un emisor de confianza • Enviar la identidad de la entidad externa como una estructura de datos clara o auto firmada • Patrón centralizado con punto de decisión de política incrustado.	
	Estándares de Autentificación	API Gateway	OAuth2 OpenID Métricas de monitorización y alertas con JWT (JSON Web Token) Inicio de sesión único (SSO)
		Patrones de diseño nativo en la nube	SecaaS (seguridad como servicio) SaaS (Software as a Service,)

Los mecanismos más utilizados han sido autenticación, autorización y la aplicación de algunos estándares; siendo la autenticación el mecanismo más utilizado para atender el problema de la seguridad. Este mecanismo comprende patrones descentralizados, políticas de patrones de decisión, patrones de inicio de sesión (logging), clave API, estructura de datos firmada, entidades externas firmadas, patrón centralizado con punto de decisión de política incrustado. Estas soluciones han sido aplicadas a los microservicios, sin embargo, no todas constituyen soluciones específicas para esta arquitectura.

3.4. Patrones de seguridad aplicados a diferentes arquitecturas

En la investigación, se llevó a cabo un análisis de los resultados obtenidos del MS; se realizó una clasificación de los diferentes estudios, los cuales muestran patrones enfocados a diferentes arquitecturas, algunos de ellos se enfocan en servicios en la nube; donde realizan conceptualizaciones, entrevistas, encuestas de fuentes académicas y de la industria, así como también hacen referencia a modelos de calidad del desarrollo del software y Normas ISO. Estos estudios proporcionan recursos útiles para arquitectos y desarrolladores de seguridad de aplicaciones sobre patrones existentes y exploran la evolución de los microservicios.

Se encontraron un total de 49 patrones, de los cuales se obtuvieron 9 estudios, seleccionados y mencionados en la (Tabla 3). Estos patrones se clasificaron de acuerdo a los atributos de calidad con los que cada uno de ellos se relaciona, de estos se realizó una selección los cuales fueron relacionados a la seguridad, autentificación, autorización. Los cuales son utilizados para el diseño de arquitectura como: SOA, DevOps (development operations) y O.O.A. (Object-Oriented Architecture). Principalmente utilizan la autentificación y autorización, para la seguridad y JWT (JSON Web Tokens) para java, así como servicios de código abierto, para los microservicios se llevan a cabo conceptualizaciones y adaptaciones mencionando que esperan realizar pruebas para trabajos futuros, ya que no existen patrones específicos para estos. En la Tabla 5 se muestran los patrones asociados a mecanismos de seguridad, identificados de acuerdo al análisis realizado que cada autor especifica en sus trabajos. Son recomendaciones que cada autor propone para su utilización de acuerdo a sus investigaciones, encuestas y experiencias propias. Esta serie de patrones podrían ser un guía para su empleo en microservicios. Es importante también resaltar que ninguna de las propuestas presenta resultados de su aplicación. Aunado a lo anterior, tampoco mencionan como medir la calidad de estas propuestas, no especifican atributos de calidad ni métricas asociados a los patrones.

Tabla 5. Clasificación de Patrones enfocados a Seguridad

Enfocados a Seguridad			
	Authentication	Authorization	Security
Patrones	• Modelo descentralizado • Modelo centralizado con un único punto de decisión política • Patrón centralizado con punto de decisión de política incrustado • Enviar la identidad de la entidad externa como una estructura de datos clara o auto firmada utilizando una estructura de datos firmada por un emisor de confianza • Patrones de diseño arcadia framework Token web JSON (JWT), OAuth 2.0	• Mensajería basada en eventos • Estrangulador del registro de servicios • Backends para Frontends • Contratos orientados al consumidor • Lector tolerante • Pasarela API • Petición-Reacción • Sistemas autónomos • Event Sourcing.	• Clave API • Lista de deseos • Límite de tarifa • Plan de tarifas • Acuerdo de nivel de servicio • Fallos de autorización (control de acceso) • Errores de aplicación y eventos del sistema, • Uso de funcionalidad de alto riesgo • Fallos de validación de entrada • Cambios de estado de la aplicación/microservicio • Patrones de diseño arcadia framework Token web JSON (JWT), OAuth 2.0

4. CONCLUSIONES

Como resultado de este MS se obtuvieron un total de 9 artículos relacionados con patrones de seguridad para microservicios; se obtuvieron 49 patrones de diversas arquitecturas de software aplicables a microservicios. La aplicación de MSA en el desarrollo de sistemas software presenta varias áreas de investigación que se están abordando; de acuerdo a la información obtenida, de artículos relacionados con patrones de seguridad, se observó que estos trabajos son propuestas de solución que no han sido probadas exhaustivamente hasta el momento, y las soluciones propuestas fueron elaboradas con

ISSN en trámite

patrones de otras arquitecturas de software. Los patrones en microservicios y la seguridad son temas que están en desarrollo; también podemos mencionar que no existe una definición exacta de microservicio ya que cada autor tiene una perspectiva diferente y brinda su punto de vista en cada trabajo. Se pudo observar que en las soluciones propuestas no se presentan que atributos de calidad y métricas asociadas a estos se pueden aplicar para determinar el estado, en cuanto a calidad, de la solución propuesta. Todas estas observaciones representan brechas de investigación para futuros trabajos sobre la seguridad para microservicios.

5. REFERENCIAS

Astudillo, M. G. (2018). Actual Use of Architectural Patterns in Microservices-based Open-Source Projects. 2018 25th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC). Nara, Japón.

Barabanov Alexander, M. D. (2020). Authentication and Authorization in Microservice-Based Systems: Survey of Architecture Patterns. Cybersecurity issues, 32-43.

Barabanov Alexander, M. D. (2021). Security Audit Logging in Microservice-Based Systems: Survey of Architecture Patterns. problemas de ciberseguridad, 71-80.

Bogner, J. F. (2021). Industry practices and challenges for the evolvability assurance of microservices. Empir Software Eng, 104.

Chondamrongkul Nacha & Jing Sun, a. I. (2020). Automated Security Analysis for Microservice Architecture. IEEE International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C), IEEE Explore, 79-82,

Martin, F. (2014). Microservices. Recuperado el 22 de agosto de2021, dehttps://martinfowler.com/articles/microservices.html.

Paulo Anselmo da Mota Silveira Neto, I. d. (2010). A systematic mapping study of software product lines testing. Information and Software Technology, 408-423.

Petersen Kai, e. a. (2008). Systematic Mapping Studies in Software Engineering. splc, 1-10.

Richardson, C. (2019). Microservices Patterns. NY: MANNING.

Rudrabhatla, C. K. (2020). Security Design Patterns in Distributed Microservice Architecture. International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS) (págs. 72-75). Los Angeles, USA: Executive Director – Solutions Architect Media and Entertainment domain.

Simon, T. F. (2021). A Comparison Between Microservice Security Design Patterns for Authentication and Authorization Flows. Stockholm sweden: kth royal institute of technology school of electrical engineering and computer science.

Stocke Mirko, e. a. (2018). Interface Quality Patterns Communicating and Improving the. EuroPLoP '18: Actas de la 23a Conferencia europea sobre lenguajes de patrones de programas, (págs. 1-16). Irsee, Germany.

Tihomir Tenev, D. B. (2018). Security patterns for microservices located on different vendors. © Journal of the Technical University - Sofia “Fundamental Sciences and Applications”, 105-108.

Torkura Kennedy A, e. a. (2017). Leveraging Cloud Native Design Patterns for Security-as-a-Service Applications. IEEE International Conference on Smart Cloud (págs. 90-97). Potsdam, Germany: Hasso Plattner Institute, University of Potsdam.

Wieringa Roel, M. N. (2006). Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: a proposal and a discussion. Conferencia de Ingeniería de Requisitos (RE) del IEEE, 102-107.

ISSN en trámite

Metodología para determinar la granularidad de un Microservicio

César Merino Ibáñez *. Juan Carlos Rojas Pérez*.
Rene Santaolaya Salgado*. Mario Guillen Rodríguez*.

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,*
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.
(e-mail:{ m21ce018, juan.rp, rene.ss, mario.gr }@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: La arquitectura basada en microservicios es una forma actual de diseño y desarrollo de software, la cual está siendo implementada por un gran número de empresas. Algunos de los principales beneficios de desarrollar sistemas con microservicios se ven reflejados en el rendimiento, escalabilidad y mantenibilidad del software, sin embargo, al ser una arquitectura reciente existen factores que deben ser atendidos para su mejora, como es el caso de la determinación del tamaño o granularidad de los microservicios. Aunque existen diferentes formas de determinar la granularidad, en este trabajo se presenta una metodología que engloba cuatro enfoques para la determinación del tamaño adecuado de un microservicio como son el modelo de dominio, los casos de uso, el diseño de la base de datos y la declaración de objetivos.

Keywords: Microservicios, granularidad, descomposición, enfoques para determinar la granularidad.

1. INTRODUCCIÓN

Desarrollar software de calidad a cualquier nivel requiere del uso de metodologías, estándares y la aplicación de paradigmas más actuales. Cuando se desarrolla un proyecto de software, este se debería diseñar con la intención de crecer, por lo tanto, es entendible que aumentarán sus recursos y funcionalidades, partiendo de esto, el uso de lenguajes de programación por sí solos no garantiza desarrollos que puedan ser reutilizables y extensibles (Medvidovic y Taylor, 2000).

En las últimas décadas han sido propuestas varias arquitecturas de desarrollo software y cada una de estas ha presentado una serie de ventajas y problemas durante el transcurso de su aplicación. Dentro de las arquitecturas que han sido propuestas se encuentran los monolitos, los cuales son aplicaciones de software cuyos módulos no pueden ser ejecutados independientemente, de acuerdo con Dragoni *et.al*. (2017), además de que cualquier cambio en su estructura es extremadamente lento, y a menudo afecta a todo el sistema. Otra arquitectura propuesta es la Arquitectura Orientada a Servicios (SOA), en esta arquitectura los componentes (funcionalidades) de la aplicación están relativamente separados y se complementan unos con otros mediante un protocolo de comunicación en red, de acuerdo con (Shadija *et.al.* 2017). Aunque SOA supone una evolución hacia arquitecturas más descentralizadas, los componentes siguen sin ser lo suficientemente autónomos como para ser independientes. Un paradigma reciente para tratar el problema presentado por los monolitos y que ha ganado un amplio reconocimiento y aceptación por la industria del software es el uso de microservicios, de acuerdo con los trabajos de (Hassan *et.al.*, 2019). Además, en los trabajos de Dragoni *et.al.* (2017), así como Lewis y Fowler (2014), describen a los microservicios como componentes granulares totalmente independientes y cohesivos que funcionan como partes de un programa más amplio, dichas partes también llamadas módulos pueden ser actualizados y desplegados sin requerir un solo cambio en el resto del sistema.

La arquitectura basada en microservicios como tecnología relativamente nueva también presenta algunos problemas o retos asociados con la modularización y refactorización, la granularidad, fallas y la seguridad entre otros, de acuerdo con (Pereira *et.al.* 2019). En este trabajo se aborda el problema de "granularidad", el cual, según Víctor Martínez (2020), parte de dos aspectos importantes, la división de las funcionalidades a desarrollar en un sistema y el tamaño adecuado para cada una de estas funciones.

Alshuqayran *et.al.* (2016) en conformidad con Hassan *et.al.* (2019), mencionan que definir objetivamente el tamaño adecuado o preciso de un microservicio repercute en atributos como: rendimiento (performance), confiabilidad (reliability), escalabilidad (scalability), mantenibilidad (maintainability) y complejidad (complexity). Determinar la granularidad de un microservicio considerando solo objetivos técnicos puede conducir a una descomposición inadecuada de funcionalidades que repercute en el valor final del servicio, como lo afirma en su trabajo (Hassan *et.al.*, 2019). Para abordar el problema de la granularidad en este trabajo se presenta una metodología que considera los aspectos estructurales y de comportamiento, aspectos reflejados en cuatro enfoques.

ISSN en trámite

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Al ser un tema actual en términos de desarrollo de software, la arquitectura basada en microservicio y su granularidad ha venido siendo abordada en múltiples artículos recientes. De acuerdo a la revisión de los trabajos relacionados, se identificaron diferentes enfoques que han sido utilizados para determinar el tamaño de un microservicio. En este análisis se destacan cuatro enfoques en que la granularidad es abordada.

1. Por Modelo de Dominio
2. Por diagrama de Casos de Uso
3. Por declaración de Objetivos o Design Thinking
4. Por diseño de la Base de Datos

Las investigaciones presentadas por Munezero *et.al.* (2018) y Zimmermann (2016), al igual que Chris Richardson (2019), argumentan que los despliegues de microservicios exitosos son posibles gracias a los paradigmas modernos de ingeniería de software, enfocándose en como la ingeniería de dominio sirve para identificar la información que necesita un microservicio y los servicios necesarios para su funcionalidad. Estas investigaciones sugieren utilizar patrones del diseño basado en dominio (DDD) para dividir los microservicios y así proporcionar una manera de establecer un buen diseño en términos de la determinación del límite apropiado.

El autor Tyszberowicz (2018), describe un enfoque sistemático para identificar los microservicios en la fase inicial de diseño, basándose en la especificación de los requisitos funcionales del sistema, expresados en casos de uso y utilizándolos para realizar una descomposición funcional, coincidiendo en parte con el trabajo de Adwan *et.al.* (2014), ya que Adwan también añade un análisis hacia el diagrama de clases. Y por su parte Axelsson y Karlkvist (2019), declaran que el análisis de casos de uso debe estar orientado hacia el estudio de los datos que se necesitan para realizar dichos casos de uso.

Por otro lado, la técnica propuesta por Levcovitz (2016), considera el análisis de la base de datos como medio de descomposición de un sistema en microservicios. También considera que un sistema grande está estructurado en subsistemas más pequeños y cada subsistema tiene un conjunto bien definido de responsabilidades empresariales, apoyando así lo mencionado por Axelsson y Karlkvist (2019), quienes declaran que los datos ayudan a comprender mejor lo que un servicio necesita.

Daya *et.al.* (2015), utiliza el pensamiento de diseño (design thinking) como un proceso para definir el alcance del trabajo en unidades funcionales utilizables y liberables. Los diseños utilizados en este proceso facilitan la descomposición funcional y la identificación de los microservicios, basándose en la declaración de objetivos y descripción de escenarios del sistema. Otros artículos que apoyan el uso de escenarios para la modularización de un sistema, son los artículos de Vera (2021) y Puerto *et.al.* (2020), donde describen "Microservice Backlog (MB)", una técnica de programación genética, totalmente automática que utiliza las historias de usuario del producto para proponer un conjunto de microservicios con una granularidad adecuada.

Otros estudios consultados de este tema utilizan formas diferentes para determinar la granularidad, como es el caso de la matriz de estructura de diseño (DSM), la cual es una herramienta de representación y análisis para el modelado de sistemas, con fines de descomposición e integración por módulos, en (Browning, 2001). O bien la indexación semántica latente (LSI), una técnica de recuperación de información que localiza temas lingüísticos en un conjunto de documentos y calcula su similitud lingüística, agrupándolos según su semejanza, en (Kuhn, 2006).

Como los trabajos antes mencionados, existen diferentes formas en que el tamaño de los microservicios ha sido determinado, muchas de estas basándose en la intuición y limitándose solo a la experiencia que tienen los diseñadores en el desarrollo de software. Si bien la experiencia de los arquitectos de software es un factor clave a considerar en la determinación del tamaño de los microservicios, esta investigación se centra en trabajos que abordan factores objetivos, como los aspectos de comportamiento, para la determinación de la granularidad de un microservicio.

La Tabla 1 muestra los cuatro enfoques que resultaron más relevantes para esta investigación, siendo el factor de uso en trabajos una de las características tomadas en cuenta para su elección, al mismo tiempo que fue considerado el detalle con que fue descrita cada actividad involucrada para la modularización de un sistema.

Tabla 1 Enfoques seleccionados para abordar la granularidad.

#	Enfoques	Autores
1	Por Modelo de Dominio / Maquina	Richardson (2019), Zimmermann (2016), Munezero et.al. (2018)
2	Por Procesos / Casos de Uso	Axelsson y Karlkvist (2019), Tyszberowicz (2018) y Adwan *et.al.* (2014)
3	Por Escenarios / Design Thinking	Daya *et.al.* (2015), Vera (2021) y Puerto *et.al.* (2020)
4	Por Base de Datos / Capacidades de negocio	Axelsson y Karlkvist (2019) y Levcovitz (2016)

3. PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA

Para la elaboración de la metodología fueron seleccionadas cuatro formas (enfoques) en que se puede descomponer un sistema en microservicios: utilizando un modelo de dominio, por diseño de la base de datos, por diagrama de casos de uso y por declaración de objetivos. Estos enfoques fueron elegidos en

ISSN en trámite

función de su repetición en las literaturas revisadas, además, se tomó en cuenta el nivel de detalle de descripción de cada proceso, dándole prioridad a aquellos que detallaban más las actividades para identificar los candidatos a microservicios.

La Figura 1, representa a la metodología general obtenida, la cual se compone de tres partes; la etapa de análisis, la de descomposición por enfoque y la de cierre o implementación. A continuación, se describen las tareas involucradas en cada paso de la metodología propuesta.

3.1 Etapa 1: Análisis

Esta primera etapa se encarga de reunir toda la información posible sobre el proyecto a realizar. Sus actividades involucradas son:

3.1.1 Definición e involucrados: Se inicia con la identificación del arquitecto y desarrolladores de software, Continuando con los usuarios directos, que son aquellos que realizan el proceso actual y que utilizarán el sistema. Los usuarios indirectos son aquellos que se ven involucrados en algún punto del proceso y por lo tanto tendrán alguna interacción (mínima) con el sistema.

3.1.2 Reunión con involucrados: Se lleva a cabo una junta entre el arquitecto o desarrollador y los usuarios (directos e indirectos) con el fin de obtener una alta comprensión de lo que se va a desarrollar. Se responde a las preguntas clave: Qué, Para qué, Quién y Cómo.

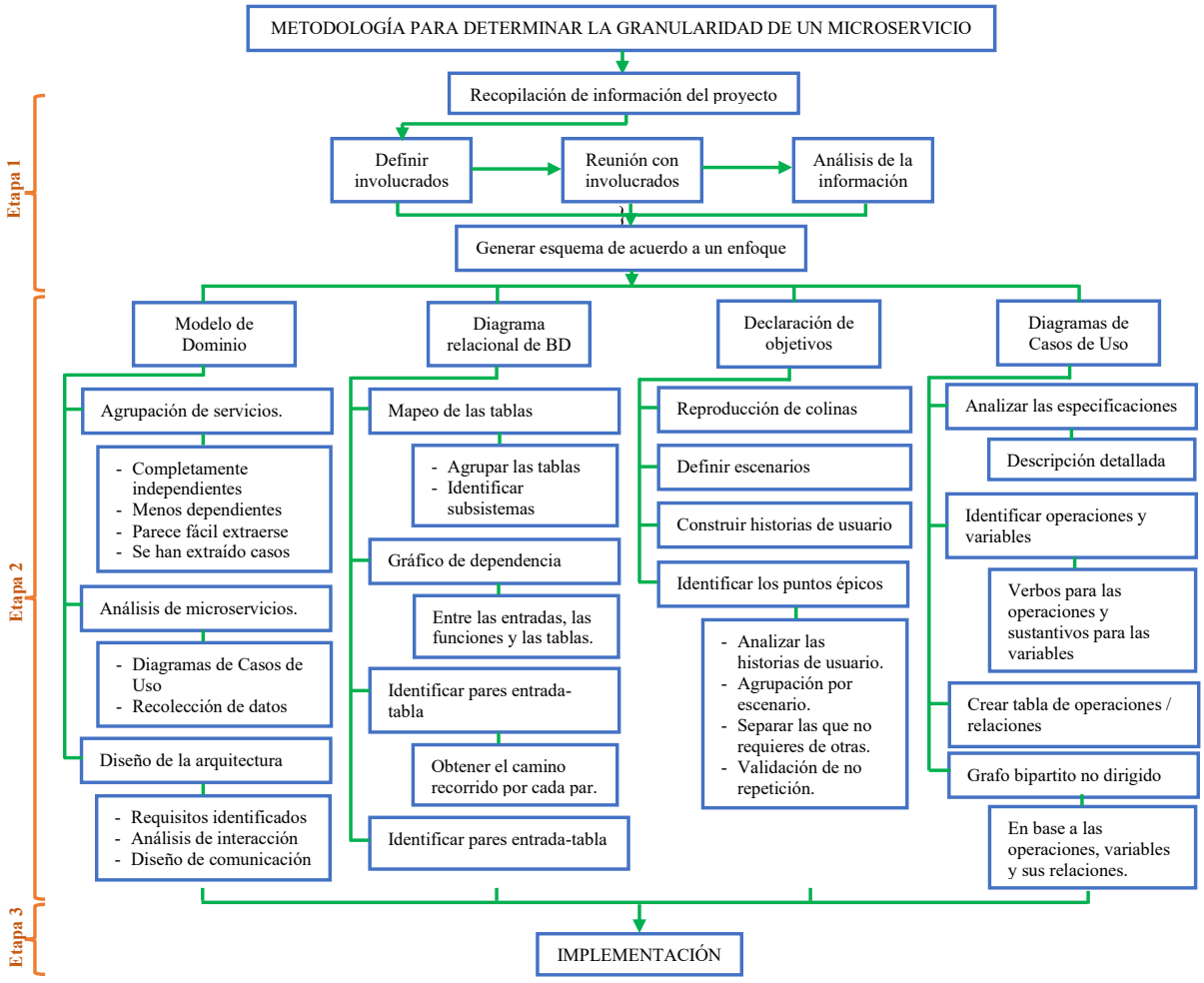


Figura 1 Metodología para determinar la granularidad de un Microservicio.

ISSN en trámite

3.1.3 Análisis de la información: Se presenta lo entendido a todos los involucrados, si es necesario se reúne más información (se regresa al concepto de reunión). Se establecen acuerdos claros de lo que se va hacer y cómo se va hacer, obteniendo una aprobación entre cliente y arquitecto para continuar con el desarrollo.

El principal objetivo de esta etapa es generar uno de los cuatro esquemas de salida, los cuales son: a) Modelo de dominio, b) Diagrama relacional de una base de datos, c) Declaración de objetivos y d) Diagrama de casos de uso.

3.2 Etapa 2: Descomposición por enfoque

Al finalizar la etapa de análisis se debe contar con un alguno de los esquemas de salida planteados, de lo contrario no se podrá continuar con el proceso, ya que para cada caso se han definido una serie de actividades que encajan exactamente con las características que presentan dichos esquemas de salida. La descomposición por enfoque consiste en la identificación de los candidatos a microservicios. En esta etapa existen cuatro diferentes caminos a seguir, cada uno de ellos representa a un enfoque, por lo tanto, solo se seguirá una de las cuatro rutas de actividades marcadas.

3.2.1 Granularidad por Modelo de Dominio

El diseño basado en dominios (DDD) es uno de los métodos propuestos para extraer microservicios de un dominio, este es un modelo evolutivo que coloca el conocimiento del dominio en el centro del diseño.

Paso 1: Construido el modelo de dominios, el siguiente paso es la agrupación de servicios, en esta fase solo están involucrados el arquitecto y los desarrolladores de software, bajo el criterio de los involucrados y siguiendo el orden de prioridad de la pirámide mostrada en la Figura 2, se procede a decidir que partes van juntas y cuales separadas.

En primer lugar, se identifican las partes completamente independientes del sistema. Estas son aquellas que por sí solas tienen un trabajo independiente dentro del sistema, por lo cual su nivel de relación en modelo de dominio es el más mínimo existente. Siguiendo la misma lógica se procede a identificar a las partes que presentan muy poca dependencia de otras, por lo cual su relación se encuentra muy aproximada al nivel mínimo. Se espera que, para estos dos niveles, se obtengan los mejores módulos candidatos a microservicios. En el nivel 3 y 4 están aquellos dominios que su extracción parece fácil y no complicaría a la arquitectura, así mismo en base a la experiencia de los desarrolladores y arquitectos, se identifican aquellos servicios que anteriormente ya han sido trabajados como módulos independientes y su despliegue ha funcionado correctamente. Para casos más complejos se tiene como candidatos a microservicios a aquellos servicios que se sabe que dentro de poco tiempo pueden cambiar, en esta misma categoría están las partes que muestran demasiada dependencia de otras, vista desde el nivel de relación que presentan en el modelo de dominio.



Figura 2 Piramide de agrupación de servicios.

Paso 2: Por cada servicio identificado anteriormente se obtendrán los requisitos funcionales de cada uno de ellos. Explicando cada requisito (por servicio) en tarjetas o algún medio de presentación, esta actividad debe ser detallada e incluir todas las tareas y subtareas involucradas.

Paso 3: Los requisitos creados en el paso anterior se utilizan para comprender cuando el microservicio necesita interactuar con otras partes del sistema. A partir de esto se analiza si la comunicación debe realizarse mediante una comunicación asíncrona o mediante comunicación síncrona.

3.2.2 Granularidad por Base de Datos

Para determinar la granularidad siguiendo este enfoque se debe contar con el diseño relacional de la base de datos del sistema, como producto de salida de la etapa de análisis.

Paso 1: Mapear las tablas de la base de datos (BD) en subsistemas. Cada subsistema representa a un área de negocio. Se analizan las relaciones que existen entre las tablas y los subsistemas para conocer como dependen entre ellas. Para esto se construye un diagrama de relación como apoyo.

Paso 2: Crear un gráfico de dependencia, donde el primer nivel representa a las entradas del sistema, los siguientes niveles serán las funciones de negocio (son los métodos que se esperan del sistema) y en el último nivel se tendrá a las tablas de la BD.

Paso 3: Identificar pares entre entradas y tablas, y los caminos existentes entre ellos, tomando en cuenta por cuales funciones se pasa y construyendo un conjunto de pares de relaciones.

Paso 4: En cuanto a la identificación de candidatos a microservicios se debe analizar lo siguiente: para cada par distinto del paso anterior (entrada-tabla) se inspeccionan las funciones que existen (en la ruta de cada par), el objetivo de este paso es identificar que reglas de negocio dependen realmente de la tabla de la BD y esas operaciones deben describirse en forma textual como reglas. Por lo tanto, para cada par (entrada-tabla) se define a un candidato a microservicio.

ISSN en trámite

En este punto solo restaría la implementación de cada microservicio identificado, no olvidándose que la selección de protocolos de comunicación y forma de almacenamiento de datos son parte importante previo a la implementación (Levcovitz *et.al.* 2016).

3.2.3 Granularidad por Declaración de Objetivos

El pensamiento de diseño es un proceso para visualizar la experiencia del usuario en su totalidad, siendo útil para definir el alcance del trabajo en unidades funcionales utilizables y liberables (Daya *et.al.* 2015).

Para seguir esta vertiente se deben tener muy claros los objetivos del proyecto, pues los objetivos definen qué se va hacer, quién lo va hacer y cómo se va hacer. Cada objetivo representa una "Colina", estas colinas informan sobre la intención del líder y permite que los equipos de trabajo usen su propia experiencia sobre cómo interpretar e implementar una solución.

Paso 1: La primera actividad de este proceso se centra en la reproducción de colinas. La reproducción de las colinas proporciona un resumen de lo que el equipo va a realizar. Estas reproducciones establecen el alcance (lanzamiento de un producto) que se tendrá en cierto periodo de tiempo. La reproducción 0 es cuando el equipo ha completado el dimensionamiento, y se compromete con los clientes en cuanto a los resultados que se quieren conseguir. Se realizan semanalmente con la participación de los equipos de desarrollo y los clientes.

Paso 2: Definición de escenarios. Un escenario es un flujo de trabajo único a través de una experiencia de usuario. Los escenarios capturan el escenario "tal cual" y se convierte en un escenario "a mejorar".

Paso 3: Creación de las historias de usuario, las cuales representan un requisito autónomo y codificable que puede desarrollarse en poco tiempo (en relación a la dimensión del proyecto), recordando siempre ser expresadas en términos de experiencia de usuario.

Paso 4: Se comienza con el análisis de las historias de usuario y se construyen descripciones detalladas del modo de operación de cada historia, con esta información se podrá hacer una agrupación de aquellas que pueden reutilizarse varias veces en un escenario, se obtendrán así agrupaciones independientes de historias que funcionen adecuadamente, por último, se valida que no existan historias repetidas en las agrupaciones. Pasando así a la etapa de implementación.

3.2.4 Granularidad por Casos de Uso

Las especificaciones de casos de uso están ampliamente aceptadas como una forma de describir los requisitos funcionales de un sistema, de acuerdo al trabajo de (Tyszberowicz *et.al.* 2018). La forma de abordar los microservicios cuando se han construido es a partir de un diagrama de casos de uso:

Paso 1: Se lleva a cabo un análisis de las especificaciones de los casos de uso, para esto y con apoyo de los requerimientos se realizan las descripciones detalladas de cada caso de uso.

Paso 2: Se identifican las operaciones del sistema y las variables de estado. Para identificar las operaciones del sistema se utilizan todos los verbos encontrados en las descripciones de los casos de uso, mientras que los sustantivos encontrados sirven para identificar las variables de estado del sistema.

Paso 3: Las operaciones y variables son registradas, en una tabla de operaciones/relaciones, cada celda de la tabla indica si la operación escribe en la variable de estado, la lee o ni la escribe ni la lee y las relaciones serán las que se dan entre cada operación del sistema y las variables de estado que la operación utiliza.

Paso 4: Para la descomposición, se construye un grafo bipartito no dirigido (G) cuyos vértices representan las variables de estado y las operaciones del sistema. Una arista conecta una operación (op) con una variable de estado (v) si y sólo si l op lee el valor de v o lo actualiza. Además, se asigna un peso a cada arista de G. Una conexión de lectura tiene un peso menor (1) y una conexión de escritura tiene un peso mayor (2). Se obtendrá entonces como resultado un gráfico que identifica clusters claramente separados. Cada uno de estos clusters representa a un candidato a microservicio.

3.3 Etapa 3: Implementación

Todos los procesos de la etapa de descomposición concluyen en el paso de la implementación, la intención de esta última etapa es llevar a cabo el desarrollo de cada microservicio identificado. Al ser una actividad que depende de la elección de plataformas de trabajo que mejor convenga a cada desarrollador, no se ahondará más sobre el tema de la implementación.

4. PRUEBAS PRELIMINARES

Siguiendo la metodología propuesta, se realizó una prueba preliminar, utilizando como caso de prueba el proyecto "Cinema", publicado por Cristian Ramirez (2017), el cual se basa en la administración de la boletería, dulcería, café y el catálogo de proyección de un cine. Cabe mencionar que las pruebas realizadas fueron construidas de forma manual.

Etapa de análisis: Dado que los requerimientos del proyecto "Cinema", están descritos desde el punto de vista de los usuarios, se optó por utilizar el enfoque de Casos de Uso de la metodología propuesta. Para la elaboración del diagrama de casos de uso se aplicó el estándar UML, basado en la norma ISO/IEC 1950.

La Figura 3 muestra los casos de uso identificados para el escenario de prueba "Cinema".

ISSN en trámite

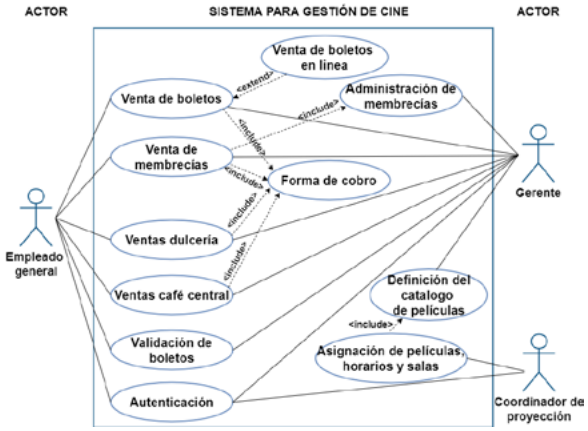


Figura 3 Diagrama de casos de uso proyecto "Cinema".

Para la descomposición por casos de uso, las actividades realizadas fueron:

- Análisis de las especificaciones: se construyeron las descripciones detalladas de cada caso de uso identificado.
- Identificación de operaciones y variables del sistema: se generó una lista con los verbos y sustantivos encontrados en los cuadros de descripción de los casos de uso.
- Construcción de la tabla de operaciones y relaciones: utilizando la información provista en el paso anterior; se identificaron las relaciones existentes entre las operaciones y variables del sistema, si se trataba de una relación de lectura, de escritura o si no había relación entre ellas.
- Elaboración del grafo bipartito no dirigido: para el cual los vértices están señalados como las operaciones y variables, mientras que las conexiones son las relaciones de lectura o escritura que existen entre cada operación y variable.

En la Figura 4 se observa la construcción del grafo bipartito no dirigido para el proyecto de “Cinema”, en este se identifican los candidatos a microservicios con óvalos de colores. Las líneas representan la relación de lectura/escritura, los textos de color negro representan operaciones y los azules a las variables de estado, el nombre de cada microservicio puede ser dado en función de la operación que tenga más relaciones, en este caso se tienen: autenticación de usuarios, administrar catálogo de películas, coordinar proyección, ventas en café central, ventas en dulcería, registro membrecías, forma de cobro, venta de membresías, venta de boletos, venta de boletos en línea y validación de boletos. El grafo fue realizado de forma manual apoyándose de la tabla de operaciones y relaciones construida en el paso anterior, aunque también puede construirse con ayuda de un software específico.

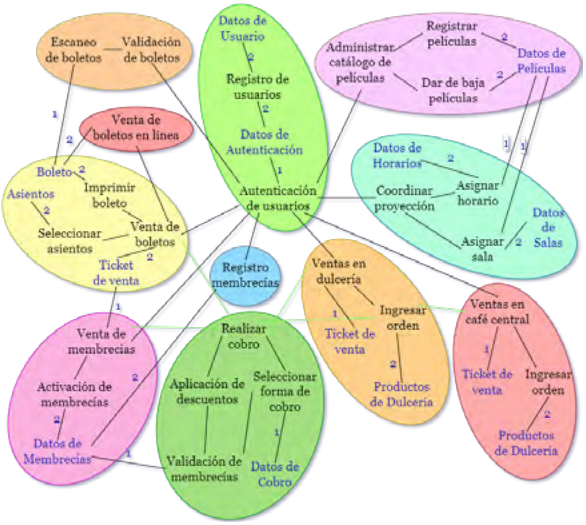


Figura 4 Grafo bipartito no dirigido con la identificación de candidatos a microservicios.

5. CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación fueron halladas múltiples formas en que se puede determinar el tamaño de un microservicio. Durante el análisis de cada enfoque que se ha utilizado para determinar la granularidad fueron encontrados muchos consejos generales, algunos de ellos de forma repetitiva, como es el caso de particionar un sistema apoyándose de un modelo de dominio, o el dividir un sistema por medio de la construcción de un diagrama de casos de uso; el hecho de que diferentes autores coincidan en un mismo modo de descomposición indica el gran potencial que tienen dichas formas para poder hacer un granulado adecuado. También fueron tomadas en cuenta las actividades aplicadas por los autores que no coincidían del todo, pero que presentaban aspectos comunes en el objetivo que perseguían, convergiendo así en algunos de los pasos involucrados en la metodología propuesta.

Es importante aclarar que en las pruebas preliminares aún no se puede establecer si el grafo presentado esta correctamente diseñado, dado que esta validación debe ser abordada en trabajos futuros con otro tipo de estudios, donde se ve involucrada la implementación de dichos microservicios y su evaluación a partir de las métricas más adecuadas.

Actualmente esta metodología continúa siendo probada en el caso de estudio “Cinema”, lo que sigue es la realización de un análisis detallado, no solo de los resultados arrojados por cada enfoque de la metodología, sino también comparando los resultados obtenidos por la metodología contra la forma en que el caso de prueba ya fue abordado por sus autores.

ISSN en trámite

A través del diseño e implementación de la metodología propuesta, se han identificado aspectos interesantes que aportan conocimiento en el ámbito de microservicios, por ejemplo, la importancia que tiene la experiencia del arquitecto de software en el diseño de una arquitectura por microservicios y el dominio y conocimiento en cada uno de los enfoques presentados. Aunque falta mucho trabajo por hacer para que esta tecnología madure, la arquitectura de microservicios ya está siendo considerada y aplicada por industrias de desarrollo de software gracias a las ventajas que presenta.

6. REFERENCIAS

Adwan, O., Yousef, R. y Abushariah, M. A. M. (2014) "Extracting SOA Candidate Software Services from an Organization's Object Oriented Models", Universidad de Jordan. Article in Journal of Software Engineering and Applications.

Alshuqayran, N., Ali, N. y Evans, R. (2016) "A Systematic Mapping Study in Microservice Architecture", Computing Engineering and Mathematics University of Brighton, UK.

Axelsson, E. y Karlkvist, E. (2019) "Extracting Microservices from a Monolithic Application Developing a Migration Strategy", University of Gothenburg, Sweden.

Baresi, L., Garriga, M. y De Renzis, A. (2017) "Microservices identification through interface analysis," in European Conference on Service-Oriented and Cloud Computing - Lecture Notes in Computer Science., vol. 10465 LNCS, pp. 19–33, doi: 10.1007/978-3-319-67262-5_2.

Browning, T. R., (2001) "Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions." IEEE Transactions on Engineering Management 48(3).

Dragoni, N., Giallorenzo, S., Lluch, A., Mazzara, M., Montesi, F., Mustafin, R., Safina, L., (2017) "Microservices: yesterday, today, and tomorrow," In: Mazzara M., Meyer B. (eds) Present and Ulterior Software Engineering. Springer.

Hassan, S., Bahsoon, R. y Kazman, R. (2019) "Microservice Transition and its Granularity Problem: ASystematic Mapping Study," Software: Practice and Experience.

Homay, A., De Sousa, M., Zoitl, A. y Wollschlaeger, M. (2020) "Service Granularity in Industrial Automation and Control Systems," in 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 132–139, doi: 10.1109/ETFA46521.2020.9212048.

Homay, A., Zoitl, A., De Sousa, M., Wollschlaeger, M. y Chrysoulas, C. (2019) "Granularity Cost Analysis for Function Block as a Service", Conference Paper, University of Berne, Switzerland.

International Technical Support Organization. (2015) "Microservices from Theory to Practice: Creating, Applications in IBM Bluemix Using the Microservices, Approach", First Edition.

Kecskemeti, G., Marosi, A. C. and Kertesz, A. (2016) "The ENTICE approach to decompose monolithic services into microservices", Institute for Computer Science and Control, Hungarian. Conference Paper.

Kuhn, A., Ducasse, S. y Gırba, T. (2006) "Semantic clustering: Identifying topics in source code", LISTIC, University of Savoie, France.

Levcovitz, A., Terra, R. y Valente, M. T. (2016) "Towards a Technique for Extracting Microservices from Monolithic Enterprise Systems", Universidad Federal de Minas Gerais, Universidad Federal de Lavras, Brazil.

Lewis, J. y Fowler, M. (2014). "Microservices", disponible en https://martinfowler.com/articles/microservices.html

Martinez, V. (2020). "Granularidad de microservicios", disponible en https://medium.com/@vandresmartinez/granularidad-de-microservicios-3d58f3002120

Medvidovic, N. y Taylor, R. (2000). A classification and comparison framework for software architecture description languages. IEEE Software Engineering.

Munezero, J., Tuheirwe-Mukasa, D., Kanagwa, B. y Balikuddembe, J., (2018) "Partitioning Microservices: A Domain Engineering Approach". ACM/IEEE Symposium on Software Engineering in Africa.

Pereira, A., Márquez, G., Astudillo, H. y Fernandez, E. (2019) "Security Mechanisms Used in Microservices-Based Systems: A Systematic Mapping," XLV Latin American Computing Conference (CLEI), IEEE Explore.

Ramirez, C., (2017) "How to build a NodeJS cinema microservice and deploy it with docker", repositorio GitHub, disponible en https://github.com/Crizstian/cinema-microservice

Richardson, C. (2019). Microservices Patterns. Whit examples in Java. Manning Publications Co. Shelter Island, NY 11964.

Shadija, Dharmendra, Rezai, Mo y Richard. (2017) "Microservices: granularity vs. performance." In: Companion Proceedings of the 10th International Conference on Utility and Cloud Computing.

Tyszberowicz, S., Heinrich, R., Liu, B. y Liu, Z. (2018). Identifying Microservices Using Functional Decomposition. The Academic College Tel-Aviv Yafo, Karlsruhe Institute of Technology, Southwest University, China.

Vera, F. H., (2021) "Modelo Inteligente De Especificación De La Granularidad De Aplicaciones Basadas En Microservicios." Universidad Francisco De Paula Santander. Cali – Colombia.

Vural, H. (2021) "Does Domain-Driven Design Lead to Finding the Optimal Modularity of a Microservice?", Information & Communication Technology Department, Havelsan Inc., 06510 Ankara, Turkey.

Zimmermann, O., (2016) "Microservices Tenets: Agile Approach to Service Development and Deployment", Universidad de Ciencias Aplicadas de Suiza Oriental.

ISSN en trámite

Sistema de Ingesta de Datos Aplicando Modelos Pull y Push en el Área de la Salud

Iran A. Melchor-Uceda*. Juan C. Olivares-Rojas*. José A. Gutiérrez-Gnecchi*, Adriana C. Téllez-Anguiano. J. Guadalupe Ramos-Díaz**.**

* *División de Estudios de Posgrado e Investigación Tecnológico Nacional de México / I. T. de Morelia, Morelia, México* (Tel: +52 443 312 1570 ext. 330; email: {M14092045@morelia.tecnm.mx, juan.or@morelia.tecnm.mx, jose.gg3@morelia.tecnm.mx}

** *Departamento de Sistemas y Computación, Tecnológico Nacional de México / I. T. de Morelia, Morelia, México* (Tel: +52 443 312 1570 ext. 230; email: {adriana.ta@morelia.tecnm.mx, jguadaluperamos@itmorelia.edu.mx}

Abstract:

Con la apertura de la revolución industrial 4.0 en materia de salud, las tecnologías de la información y comunicación (TIC's) que se utilizan día con día se encuentran en constante evolución y mejora ha tal grado de sustituir procesos de forma manual por procesos completamente automatizados a fin de erradicar enfoques tradicionales y obsoletos. En este trabajo se muestra el modelo de un sistema de ingesta de datos para dispositivos médicos, sensores y dispositivos usables para extraer los datos en crudo de dichos dispositivos a través de la aplicación de dos herramientas tecnológicas de gran impacto y relevancia: las tecnologías *pull* y *push*. El modelo propuesto se encarga de la extracción, procesamiento y almacenamiento de los datos a través de una aplicación Web que permite visualizar los datos e información de salud proveniente de estudios de electrocardiografía de 3 y 12 derivaciones, un reloj inteligente Huawei Watch Fit y una báscula inteligente, para posteriormente almacenar la información en un lago de datos, con el propósito de poder combinar y homogeneizar los datos en un mismo formato. Dicha homogenización facilitará el análisis y estudio de los datos para su posterior procesamiento permitiendo innovar dentro del área de la salud.

Keywords: Dispositivos médicos, Dispositivos usables, ECG, Lago de datos, Modelo Pull, Modelo Push, Sensores.

1. INTRODUCCIÓN

Los seres humanos han luchado con problemas de salud durante miles de años, y las enfermedades a menudo causan gran ansiedad y dolor, es por ello que los pacientes deben acudir al hospital cada vez que necesitan atención médica (Wang et al., 2017), sin embargo, aumenta el inconveniente de la monitorización de la salud en tiempo real y a largo plazo especialmente para pacientes con enfermedades crónicas.

De acuerdo con (Azarm et al., 2017), existe una necesidad creciente de un sistema de datos de salud interoperable que proporcione una visión común compartida entre los datos esenciales de una persona a cualquier proveedor de atención médica independientemente de dónde se encuentre físicamente el proveedor, la persona o la organización a la que pertenezcan.

En México existen alrededor de 23,260 unidades de salud, al sector público pertenecen el 86.8 % y 17.2 % al sector privado. Sin embargo, cada unidad médica cuenta con diversos dispositivos para recabar información de los pacientes y 80 % de dichos datos no se encuentran estructurados, por lo que son almacenados bajo diferentes estructuras y protocolos que puede ser en forma de pruebas de laboratorio, imágenes o transcripciones médicas, dificultando así la capacidad de respuesta de los médicos (Uso del big data en el sector salud, 2016). En consecuencia, surgen herramientas que están comenzando a tener mucho impacto y relevancia no solo en el sector salud, sino que también en otros sectores de aplicación, dicha herramienta es el *data lake* (lago de datos en español), el cuál es un repositorio en el que se almacenan grandes cantidades de datos en su formato original y sin ser sometidos a ninguna transformación previa, incluyendo datos estructurados, semiestructurados y no estructurados, para ser analizados posteriormente (John y Misra, 2017).

Por tal motive este trabajo propone un modelo de un sistema de ingesta de datos basado en un esquema de lago de datos, alpicando las tecnologías *pull* y *push*, facilitando la integración de datos provenientes de diversos dispositivos medicos, sensors y usables a fin de poder mitigar la interoperabilidad de los datos hospitalarios en línea y en tiempo real.

Este manuscrito está estructurado de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan algúnos trabajos relacionados que han tratado de resolver la problemática planteada comparandola con nuestra propuesta. La sección 3 describe a detalle el modelo de la solución propuesta, mientras que en el apartado 4 se muestran los resultados obtenidos de momento.

Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones y trabajo a future.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

ISSN en trámite

Los recursos de investigación en materia de salud están dirigidos en prever la atención de los pacientes en forma de estudios, registros y demás información que sea vital y proporcione datos relevantes sobre el estado de salud del paciente.

Es por ello que estamos comenzando a persuadir cambios paulatinos y constantes en materia de salud de forma tecnológica e innovadora a fin de poder solventar los problemas tradicionales que acongojan a dicho sector, tal es el caso de la industria 4.0 y sus principales tecnologías habilitadoras de la información y la comunicación que están cambiando por completo tanto el mundo de los servicios como en el de la producción; especialmente en el dominio de la salud, donde la Internet de las cosas, la computación en la nube, en la niebla y las tecnologías de *big data* están revolucionando el cuidado de la salud y todo su ecosistema, moviéndolo hacia el cuidado de la salud 4.0, incrementando así la esperanza de vida en las últimas décadas conllevando hacer uso de herramientas tecnológicas innovadoras capaces de facilitar la realización de actividades o tareas desde las más simples hasta las más complejas (Gantz y Reinsel 2012).

Sin embargo, los esfuerzos para almacenar, administrar y analizar estos conjuntos de datos en aumento han sobrepasado los límites de los sistemas tradicionales de tecnología de la información para el cuidado de la salud (Jordan, 2015), enfrentando con ello un sin número de desafíos donde dichos sistemas están respondiendo lentamente poniendo énfasis en las formas de aumentar la velocidad y fidelidad de lo que se puede aprender y extraer de los datos (Gantz y Reinsel 2012), debido a que el personal de dicha área se encuentra muy arraigado con los sistemas y métodos implementados de manera tradicional.

De acuerdo con (Jordan, 2015), la documentación en pacientes es una técnica que se remonta al año 1600 A.C. donde se guardaba la información en papiro en Egipto. A partir de ese momento se percibió que el salvaguardar documentación sobre el estado de salud del paciente era un proceso importante en donde se recolectaba un cuadro de cómo estaba la salud del paciente.

Para el año 2013 los documentos, procesos e información con la cual operaba la secretaría de salud en México, estaba prácticamente vinculada a los procesos tácticos y estratégicos que se llevaban de manera manual, con documentos en papel y de forma imagenológica. Dichos elementos se custodiaban, almacenaban y administraban internamente en las áreas de archivo clínico con el consiguiente deterioro natural por el uso que ello implicaba y pérdidas constantes de los documentos de cada uno de los usuarios atendidos, que contienen información relevante para los profesionales de la salud y la historia médica del paciente, sus antecedentes, diagnósticos y pronósticos en materia de salud (Morales Velázquez, 2019).

Pese a los avances científicos y tecnológicos que han repercutido paulatinamente el Expediente Clínico Electrónico o Historia Clínica Electrónica (*HCE*) es uno de los ejemplos más representativos del desarrollo de la Informática Biomédica en México (Casas, et al., 2016), generando la digitalización de información, creando datos valiosos sobre los pacientes y los medicamentos (Rangarajan et al., 2015) y que de esta manera los pacientes puedan ser monitorizados desde el lugar donde se encuentren (Shahzad et al., 2018) sin necesidad de tener que trasladarse a un centro de salud más cercano.

De acuerdo con (Hardin y Kotz,2021), la combinación de los datos producidos por los dispositivos *mHealth* puede brindar a los proveedores de atención médica una visión más holística de la salud de un paciente, aumentar el nivel de atención al paciente y reducir los costos operativos. Sin embargo, existe la dificultad de crear un ecosistema de intercambio de datos confiable y seguro para dispositivos *mHealth*, ya que los dispositivos se implementan con diferentes tecnologías y son administrados por diferentes organizaciones.

Según (Zhang et al., 2020), con el advenimiento de la era del *Internet of Health (IoH)* el internet de la salud, proporciona los servicios médicos o de salud tradicionales que están migrando gradualmente a la Web o Internet y han producido una cantidad considerable de datos médicos asociados con pacientes, médicos, medicamentos, infraestructura médica, etc. La fusión y los análisis efectivos de estos datos de *IoH* tienen un significado positivo para el diagnóstico científico de desastres y los servicios de atención médica. Sin embargo, los datos de *IoH* a menudo se distribuyen entre diferentes departamentos y contienen privacidad de usuario parcial.

(Jaleel et al., 2020), menciona que la era de los dispositivos inteligentes y los vecindarios conectados, el monitoreo y la atención ubicuos de los pacientes son posibles con *Internet of Medical Things* (*IoMT*), internet de las cosas médicas. Los dispositivos de salud inteligentes pueden cumplir bien su propósito cuando pueden compartir los datos de los pacientes entre sí. Sin embargo, los formatos de datos varían ampliamente entre proveedores, lo que hace que estos dispositivos no sean interoperables.

(Pandey et al., 2020) nos dice que la gestión de la integridad de los datos es una tarea desafiante para cualquier experto o investigador, especialmente en el dominio de la integridad de los datos de atención médica, debido a que no existe algún Sistema que permita integrar los datos provenientes de diversos dispositivos en un mismo contexto sin tener pérdida de datos.

Por ende, las tecnologías *pull* y *push* comienzan a tener impacto y relevancia en diversos campos de aplicación, ya que permiten solventar situaciones que acongojan algún tema en particular.

La tecnología *pull* es un tipo de comunicación que tiene lugar a través de Internet cuando un cliente inicia una transacción solicitando información de un servidor. Cuando escribe una URL en la barra de direcciones de su navegador, y su navegador envía esa solicitud a través de Internet a un servidor, acaba de implementar la tecnología *pull* y es utilizada cada vez que se inicia la transferencia de información mediante una solicitud enviada desde un cliente a un servidor (Itnadmin, 2020).

Las tecnologías *push*, son herramientas más simples de construir, reduciendo la cantidad de tiempo para lanzar algún sistema inicial, en donde se lleva a cabo una transacción de datos que son iniciados por el emisor de la misma, frente a la tecnología tradicional de pull, donde es el receptor el que inicia

ISSN en trámite

la transacción. Los datos entrantes se transmiten a todos los usuarios y sistemas integrados, en donde cada aplicación y sistema descendente que recibe los datos tiene sus propias reglas sobre qué datos son válidos o no y cómo limpiar el flujo entrante para su uso (Branigan, 2017).

Como puede observarse en la descripción de trabajos previos, se han realizado investigaciones referentes a la problemática a resolver, pero no se ha adaptado a las características de un modelo de un sistema de ingesta de datos que permita la integración e interoperabilidad de los datos provenientes de dispositivos médicos, sensores y dispositivos usables, en línea y en tiempo real.

Es por ello que se proponer un modelo de un sistema de ingesta de datos, para el almacenamiento de la información procedentes de dispositivos médicos, sensores y usables, logrando una interconectividad entre ellos, para poder homogenizar la información contenida y así poder almacenarla dentro de un modelo de lago de datos que permita monitorizar y visualizar parámetros relevantes de la salud del paciente de forma segura y confiable abaratando costos de operación y generando una herramienta adicional al personal de salud, haciendo uso de las Tecnologías de la Información y comunicación (*TIC*).

3. SISTEMA DE INGESTA DE DATOS APLICANDO UN MODELO *PULL* Y *PUSH*

En la Figura 1 se presenta el modelo a implementar para la adquisición de los datos provenientes de dispositivos medicos, sensores y usables, con la finalidad de que los datos puedan ser interoperados en línea y en tiempo real.

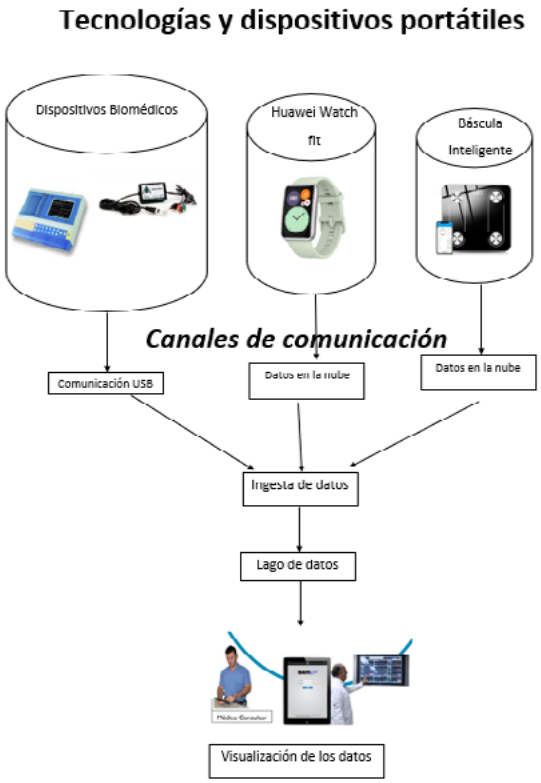


Fig. 1. Adquisición de datos implementando diversas tecnologías.

De la figura anterior, se pueden distinguir las siguientes etapas para la obtención y procesamiento de la información:

Base de datos de los dispositivos: en esta etapa inicial se comienza con la recolección de los datos de los dispositivos, recordando que cada dispositivo maneja un formato diverso sobre sus datos.

Medios de comunicación: en esta etapa se obtuvo la información de los dispositivos a través de diversos canales de comunicación, en particular la comunicación USB y los datos en la nube.

Ingesta de datos: para esta etapa se obtuvieron los datos en tiempo real para su posterior procesamiento y/o tratamiento de forma convincente.

Lago de datos: corresponde a la arquitectura implementada para el desarrollo del presente trabajo con la finalidad de poder proporcionar los datos en el momento solicitado y en tiempo real.

Visualización de los datos: corresponde a la etapa final por medio de la cual se visualizaron los resultados obtenidos y previamente procesados.

ISSN en trámite

De la Fig. 2, se presenta el sistema de ingesta de los datos, implementando un modelo de lago de datos conformado por pacientes, citas médicas, historia clínica, dispositivos usables y dispositivos médicos, en donde se lleva a cabo altas, bajas, consultas, modificaciones y la integración de los datos provenientes de los sensores, dispositivos médicos y usables implementados, con la finalidad de poder generar una herramienta que permita coadyuvar al sector salud en la recolección de información y datos provenientes del paciente, médico y dispositivos biomédicos.



Fig. 2. Sistema de ingesta de datos.

Para poder llevar a cabo la extracción y adquisición de los datos provenientes de los dispositivos médicos como un electrocardiograma de 3 y 12 derivaciones, usables como un *smartwatch fit* y sensores como una báscula inteligente fue necesario la implementación de dos modelos tecnológicos, un modelo *pull* y un modelo *push*.

En la Fig. 3, se presenta el modelo *push* necesario para la extracción de la información proveniente de los dispositivos médicos debido a que no poseían *Application Programming Interface* o interfaz de programación avanzada *(APIs*) que facilitaran el proceso de extracción de los datos particularmente del equipo de electrocardiografía (ECG) de 12 derivaciones BTL-08 MT Plus, debido a que los datos provenientes de este dispositivo se encontraban codificados.



Fig. 3. Modelo *Push* propuesto.

La figura anterior muestra el proceso necesario para generar un procesamiento y análisis de los datos procedentes de los dispositivos médicos portátiles esto principalmente debido a que cada equipo manejaba un formato de archivo de almacenamiento de la información diferente, para el caso del BTL-08 MT Plus los datos se obtenían en un formato PDF, para el caso del equipo Vernier, esté proporcionaba los datos en un formato CSV, por lo cual para el equipo BTL-08 MT Plus fue necesario implementar algunas herramientas adicionales como Python para poder generar un proceso de conversión de PDF a CSV y así poder tratar de unificar la información de los dispositivos portátiles médicos en un mismo formato y posteriormente tener un entorno visual de la información, en donde se genera una petición de envió de la información en el servidor al validar una ruta IP.

Posteriormente se usó un modelo *pull*, esto para la ingesta de los datos provenientes de una báscula y un reloj inteligentes, debido a que estos dispositivos cuentan con su propia *API* lo cual fácilita algunas cuestiones de ingesta y procesamiento de los datos.



Fig. 4. Modelo *Pull propuesto*.

La figura anterios muestra el proceso para la recolección de los datos de los sensores y los dispositivos usables que son almacenados y recolectados a través de un repositorio donde cada que se realiza un cambio se estará enviando la actualización de la información a través de la suscripción realizada por medio de las *APIs*, con lo cual se lleva a cabo una petición que tiene origen directamente en el cliente y una vez que la información quiera ser visualizada podrá ser apreciada a través de una interfaz gráfica contenida dentro de un servidor ya sea local o de dominio público visualizada en computadoras y dispositivos móviles a fin de reducir tiempos de consulta no solo para el personal de salud, sino que también para que el usuario pueda consultar la información propia en cualquier tiempo y momento solicitado.

4. RESULTADOS

ISSN en trámite

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los modelos de ingesta de datos provenientes de dispositivos médicos, sensores y usables.

Inicialmente se trabajó con los dispositivos médicos, para este caso particular un ECG de 3 y 12 derivaciones, en donde aplicando el modelo pull, se pudo homogenizar y estandarizar la información en un mismo formato, continuando con un sistema de registro de la información de los datos, almacenada en una base de datos.

En la Fig. 5, se muestra el proceso desarrollado, en donde se generar un proceso de conversión para pasar del formato PDF a CSV, una vez hecha esta conversión el archivo se guarda en una carpeta para que posteriormente ese archivo pueda ser seleccionado y guardado en la base de datos desarrollada para su posterior visualización de los datos o bien para un almacenamiento de los mismos.

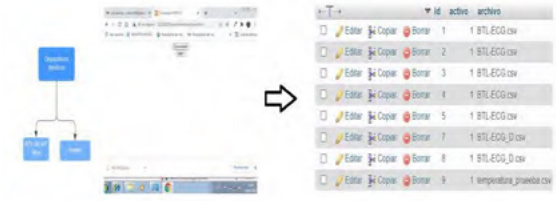


Fig 5. Implementación del modelo *pull*.

Ahora bien para la extracción de los datos provenientes de los usables y sensores y con ayuda de las *APIs* se pudo extraer la información de los mismos, accediendo a la información contenida y almacenada en Google Fit que contiene los datos de salud de Huawei y de la báscula inteligente. En la Fig. 6, se muestra la extracción de la información tras aplicar el modelo *pull*, en donde se pueden visualizar datos como pasos recorridos, calorías consumidas, tiempo de sueño y el peso del usuario vinculadas con la cuenta de Gmail la cual permitió generar el vinculo y sincronización de los datos.



Fig. 6. Implementación del modelo *push*.

Finalmente en la Fig. 7, se presenta el entorno gráfico desarrollado en donde se puede almacenar, editar, consultar, agregar y borrar datos proveneintes de pacientes, médicos, citas, historias clinicas, dispositivos médicos y dispositivos usables, a fin de tener un expediente con infomración actualizada por parte del paciente y que permita visualizar la misma en cualquier tiempo, instante y momento según se requiera.

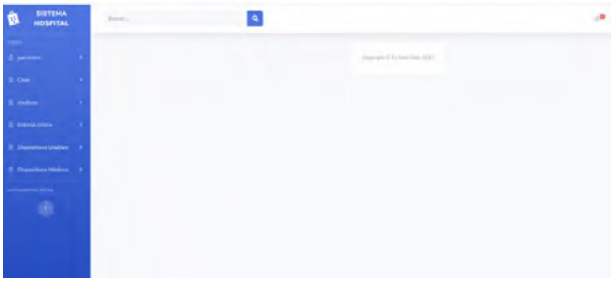


Fig. 7. Entorno visual de la interfaz.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Con el Sistema de ingesta de datos realizado implementando los modelos *pull* y *push*, fue posible unificar y homogenizar los datos y la información provenientes de los dispositivos médicos, sensores y dispositivos usables implementados a fin de poder coadyuvar y generar nuevas herramientas científicas y tecnológicas que sirvan como base para futuras investigaciones o bien se apliquen de manera directa dentro del sector salud,

ISSN en trámite

generando una reducción de costos y tiempos de espera entre el paciente y el personal de salud.

El modelo *push* se implementó para aquellos dispositivos que no presentaban una *API*, donde su software se encontraba restringido y limitado por no poseer las licencias puntuales y el modelo *pull* se implementó para todos aquellos dispositivos que contenían una *API*, lo cual facilitaba la extracción de los datos de manera más fácil.

Adicionalmente, se logró implementar todo el sistema dentro de un servidor Web disponible en Internet.

Se pretende como trabajo a futuro poder implementar los modelos *pull* y *push* a otros dispositivos como el glucómetro, poder aplicar técnicas de análisis de datos y finalmente aplicar el protocolo de comunicación MQTT.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo financiero a través del proyecto 10399.21-P. Iran A. Melchor-Uceda agradece al CONACyT por el apoyo dado a través de la beca para estudios de maestría.

REFERENIAS

Brown, F., Harris, M.G., and Other, A.N. (1998). Name of paper. In Name(s) of editor(s) (ed.), *Name of book in italics,* page numbers. Publisher, Place of publication.

Azarm, M., Backman, C., Kuziemsky, C. y Peyton, L. (2017). Breaking the Healthcare Interoperability Barrier by Empowering and Engaging Actors in the Healthcare System. Procedia Computer Science, 113, 326–333. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.341

Branigan, J. (2017, 8 de mayo). The pros and cons of pull and push models for processing IoT data. Purchase Intent Data for Enterprise Tech Sales and Marketing - TechTarget. https://www.techtarget.com/iotagenda/blog/IoT-Agenda/The-pros-and-cons-of-pull-and-push-models-for-processing-IoT-data

Casas, M. J. M., Zavala, J. H. R., Romero, A. D., Franco, A. I. M., González, A. A. M., Varela, T. V., ... & Núñez, A. G. J. (2016). Percepción de la utilidad del Expediente Clínico Electrónico en un Instituto Nacional de Salud. Revista CONAMED, 21(4), 186-191.

Gantz, J., Reinsel, D. (2012, diciembre de). THE DIGITAL UNIVERSE IN 2020: Big Data, Bigger Digital Shadow s, and Biggest Grow th in the Far East. Das Storage-Magazin - speicherguide.de. https://www.speicherguide.de/download/dokus/IDC-Digital-Universe-Studie-iView-11.12.pdf

Hardin, T. y Kotz, D. (2021). Amanuensis: Information provenance for health-data systems. Information Processing & Management, 58(2), 102460. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2020.102460

ltnadmin. (2020, 29 de marzo). What Is Pull Technology? The Explanation Is Surprisingly Easy | Website Builders.com. Website Builders.com. https://websitebuilders.com/how-to/glossary/pull/

Jaleel, A., Mahmood, T., Hassan, M. A., Bano, G. y Khurshid, S. K. (2020). Towards Medical Data Interoperability Through Collaboration of Healthcare Devices. IEEE Access, 8, 132302–132319. https://doi.org/10.1109/access.2020.3009783

John, T. y Misra, P. (2017). Data Lake for Enterprises: Lambda Architecture for building enterprise data systems. Packt Publishing.

Jordan, L. (2015). The problem with Big Data in Translational Medicine. A review of where we've been and the possibilities ahead. Applied & Translational Genomics, 6, 3–6. https://doi.org/10.1016/j.atg.2015.07.005

Morales Velázquez, J. G. (2019). Sistema de administración médica e información hospitalaria con expediente clinico electrónico, una experiencia en ciudad de méxico. Boletín CONAMED. http://www.conamed.gob.mx/gobmx/boletin/pdf/boletin26/Besp26_11.pdf

Pandey, A. K., Khan, A. I., Abushark, Y. B., Alam, M. M., Agrawal, A., Kumar, R. y Khan, R. A. (2020). Key Issues in Healthcare Data Integrity: Analysis and Recommendations. IEEE Access, 8, 40612–40628. https://doi.org/10.1109/access.2020.2976687

Rangarajan, S., Liu, H., Wang, H., & Wang, C. L. (2015). Scalable architecture for personalized healthcare service recommendation using big data lake. In Service research and innovation (pp. 65-79). Springer, Cham.

Shahzad, A., Lee, Y. S., Lee, M., Kim, Y.-G. y Xiong, N. (2018). Real-Time Cloud-Based Health Tracking and Monitoring System in Designed Boundary for Cardiology Patients. Journal of Sensors, 2018, 1–15. https://doi.org/10.1155/2018/3202787

Usos del big data en el sector salud. (2016).

Wang, X., Liu, Z. y Zhang, T. (2017). Flexible Sensing Electronics for Wearable/Attachable Health Monitoring. Small, 13(25), 1602790. https://doi.org/10.1002/smll.201602790

Zhang, Q., Lian, B., Cao, P., Sang, Y., Huang, W. y Qi, L. (2020). Multi-Source Medical Data Integration and Mining for Healthcare Services. IEEE Access, 8, 165010–165017. https://doi.org/10.1109/access.2020.3023332

ISSN en trámite

Un vistazo más profundo a la visualización de datos del seguimiento ocular

Derick A. Lagunes-Ramírez *, Gabriel González-Serna*, Leonor Rivera-Rivera **

* Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos México (Tel: +52 777 3637770; e-mail: d18ce078@cenidet.tecnm.mx, gabriel.gs@cenidet.tecnm.mx).

** Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos México.

Resumen: Gracias a la simplificación y facilidad de adquisición de tecnologías para realizar el seguimiento ocular (SO), han aumentado los trabajos relacionados al comportamiento humano en distintos campos de la ciencia. El objetivo de este trabajo es revisar distintas técnicas de visualización de datos del SO utilizadas normalmente para el análisis de patrones de comportamiento. Para ello se realizó una compilación de las técnicas más comunes observadas en el estado del arte y se desarrolló un análisis de cada una de ellas. Entre las técnicas más comunes revisadas predominan los análisis de tipo visual como los mapas de calor, mapas de rutas y áreas de interés además de distintas técnicas de análisis relacionadas con los parpadeos y la pupila. Finalmente se realizan recomendaciones sobre las condiciones óptimas para realizar experimentos con SO y uso de técnicas de visualización de datos en función del objetivo de la investigación.

Palabras clave: Seguimiento ocular, interacción humano-computadora, patrones de comportamiento, visualización de datos

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de la captura de datos oculares de una persona se le conoce como seguimiento ocular (SO). La visualización de los datos del comportamiento ocular de un sujeto de prueba, ayuda a los investigadores a entender mejor las opiniones, decisiones y sentimientos que resultan del procesamiento mental de una persona al observar o interactuar con un cierto estimulo. Estos movimientos del comportamiento que suceden en los ojos, son reacciones difíciles de controlar, por lo que el análisis de estos datos ofrece información objetiva a los investigadores sobre las reacciones de las personas. El SO es una tecnología que ha evolucionado a través del tiempo y se ha vuelto más accesible y portátil. Esto ha provocado que en los últimos años las investigaciones de SO se hayan vuelto bastante populares y utilizadas en un amplio abanico de disciplinas como por ejemplo en la medicina, psiquiatría, lingüística computacional, interacción humano-computadora (HCI), computo afectivo, entre otros.

El SO nos permite analizar el movimiento de los ojos mientras el usuario reacciona a distintos estímulos que no necesariamente deben ser visuales (imágenes, vídeos, software o cualquier objeto convencional), ya que estímulos de otro tipo como los sonidos o el procesamiento cognitivo resultado de realizar actividades mentales también están relacionados con los patrones de comportamiento en los ojos (Gerdes et al., 2020; Zagermann et al., 2018). El análisis de las características oculares como pupila, fijaciones, movimientos sacádicos y parpadeos proporciona información sobre el estado afectivo, comportamiento y atención de los usuarios. Los estudios relacionados con el SO pueden proporcionar una forma natural y eficiente de observar el comportamiento del usuario (Lu et al., 2015). Además, en comparación con otros sensores para observar el comportamiento humano como los de electroencefalografía (EEG), el SO puede ser no invasivo, más barato, más fácil de analizar y de comprender.

Sin embargo, el uso y análisis de los datos de seguimiento ocular dependerá de la aplicación de la investigación. En este trabajo se discutirá un vistazo más profundo a diferentes técnicas de visualización de datos oculares, como los mapas de atención visual (mapas de calor y mapas de rutas), áreas de interés, análisis de la pupila y del parpadeo. Las cuales pueden ser utilizadas para el análisis del comportamiento humano en diferentes áreas de investigación.

2. OBTENCIÓN DE DATOS

Para rastrear los ojos y extraer información de los movimientos de los ojos, existen tres métodos: 1) Procesamiento de imágenes de los ojos, donde cámaras de video registran el comportamiento de los ojos del usuario, luego usando el procesamiento de imágenes es posible determinar datos sobre el

ISSN en trámite

comportamiento de la mirada. 2) Sensores de luz infrarroja, esta es disparada desde el sensor hacia el rostro de la persona, los haces de luz son reflejados en la pupila de los ojos y son devueltos al sensor, el cual procesa esta información para calcular y registrar el comportamiento de los ojos. Finalmente, 3) La medición del potencial eléctrico, esté no es un método de registro de información del SO muy utilizado, este método es invasivo porque mide el potencial eléctrico de los músculos alrededor de los ojos usando electrodos.

La información de SO puede ser extraída por los investigadores utilizando software y cámaras de vídeo convencionales o cámaras web. Sin embargo, hoy en día existen sensores comerciales los cuales incluyen las herramientas necesarias: Cámaras (una o dos para cada ojo), luces infrarrojas y aditamentos especiales para ser colocados en distintos monitores de computadora o lentes. Estos sensores de SO están especialmente diseñados para obtener la información del comportamiento de una manera más fluida. Ejemplos de estos sensores son el sensor GP3 HD de Gazepoint (Gazepoint, 2021) o el sensor 4C de Tobii (Tobii, 2017).

2.1 Puntos de visión

La unidad básica del SO son los puntos de visión. Si se representa el espacio de la visión de una persona como un plano de dos ejes con coordenadas *x*, *y*. Un punto de visión (1) se puede representar como un conjunto que contiene tres elementos en ese plano: 1) Una coordenada *x*, 2) Una coordenada *y* y 3) Una estampa de tiempo *t*.

$$\textit{punto de visión} = \{x, y, t\} \qquad (1)$$

Comúnmente el plano de visión representa una pantalla o monitor donde está colocado un sensor de seguimiento ocular, pero también puede representar el plano de visión humano cuando se utilizan sensores SO vestibles en forma de lentes. La variable *t* registra la etiqueta de tiempo en la que el usuario miraba el punto (*x, y*).

2.2 Puntos de fijación

Los puntos de fijación se obtienen a partir de los puntos de visión de los sujetos calculando la diferencia entre la velocidad de un primer punto de visión al siguiente o utilizando grupos de puntos consecutivos dentro de una determinada dispersión o separación máxima (Salvucci & Goldberg, 2000). En otras palabras, los puntos de mirada del seguimiento ocular se agregan en función de un área concentrada y un intervalo de tiempo. El área de agregación suele ser de unos 20 a 50 píxeles, en un intervalo de tiempo entre 200 y 300 ms (Holmqvist et al., 2011). Los puntos de fijación resultantes se representan como muestras discretas de puntos estables donde mira el ojo (Borys & Małgorzata, 2017), se traducen directamente como un indicador de atención del usuario. Las fijaciones son la base para obtener otros tipos de métricas de análisis de seguimiento ocular, como mapas de calor, mapas de rutas sacádicas y áreas de interés. Las fijaciones se pueden representar como un conjunto de cinco elementos (2): Coordenada *x*, coordenada *y*, tiempo de inicio t_i, tiempo de fin t_f y duración de la fijación *d*.

$$\textit{punto de fijación} = \{x, y, t_i, t_f, d\} \qquad (2)$$

2.3 Dilatación de la pupila

El comportamiento de la pupila es una característica ocular relacionada con los cambios en los estados mentales de las personas. La dilatación, o el cambio del tamaño, de la pupila es una reacción física que ocurre ante a estímulos emocionales y cognitivos (Balkenius et al., 2019; Kosch et al., 2018; Mitre-Hernandez et al., 2020; Pfleging et al., 2016).

La dilatación puede ser capturada mediante cámaras de video incorporadas en los sensores de seguimiento ocular, donde se obtiene el área total de la pupila mediante el procesamiento de la imagen de la cámara y es medida en milímetros. Algunos autores utilizan una línea base neutra para definir el punto de inicio de la pupila del usuario antes de comenzar con sus experimentos, de esta manera es más fácil observar el aumento o la reducción en el tamaño de la pupila en cada sujeto de pruebas. Ya que el tamaño de la pupila de cada persona es diferente y también se ve afectado por la luz, los estímulos emocionales externos, la carga mental, etc. (Li et al., 2020). Debido a todas las variables que afectan la dilatación de la pupila, es recomendable controlar el ambiente de pruebas para reducir la variación de este dato.

De manera general, la dilatación de la pupila durante una prueba de seguimiento ocular puede ser representa por un conjunto (3) de tamaño en milímetros *s* y una estampa de tiempo *t*.

$$\textit{pupila} = \{s, t\} \qquad (3)$$

2.3 Parpadeos

Los parpadeos se representan por un cierre y una apertura rápidos del ojo con una duración media de 150-300 ms (Stern et al., 1984). Estos pueden servir como un indicador de atención o carga cognitiva (Fogarty & Stern, 1989; Lagunes-Ramírez et al., 2020). Realizar parpadeos más frecuentemente y largos puede representar aburrimiento o falta de atención, mientras que una menor frecuencia del parpadeo puede representar interés de la persona en alguna actividad como leer o ver una película. Algunos estudios correlacionan la frecuencia de parpadeo con la carga cognitiva en diferentes niveles de dificultad en tareas (Lagunes-Ramírez et al., 2020; Mallick et al., 2016). Las características de parpadeo se pueden obtener del análisis de los videos de pruebas de SO y normalmente se

ISSN en trámite

miden como eventos que ocurren en cierta estampa de tiempo, donde *n* representa el número de parpadeo y *t* la estampa de tiempo (4).

$$parpadeo = \{n, t\} \quad (4)$$

3. VISUALIZACIÓN DE DATOS

3.1 Mapas de calor

Los mapas de calor son una representación de la atención visual de un usuario o de un conjunto de usuarios, para visualizar la concentración de puntos de visión o de fijación en un estímulo se utilizan gamas de colores para representar temperatura (azul = frio, verde = tibio y rojo = caliente): Las temperaturas altas indican mayor tiempo de atención en esa área (ver Figura 1).

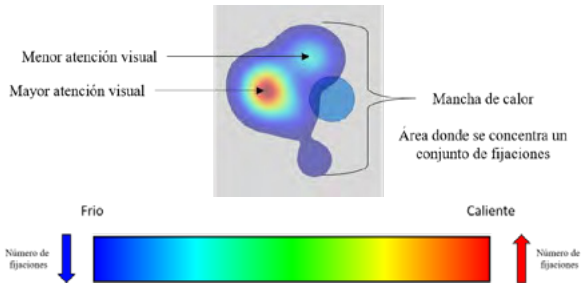


Fig. 1. Ejemplo de mapa de calor y de la gama de colores de temperatura.

Para calcular el color de temperatura en el mapa de calor, la formula (5) se utiliza por cada fotograma (múltiples en el caso de mapas de calor en video), donde se debe tratar cada pixel disponible en la imagen como un espacio en un arreglo de dos dimensiones, luego utilizando cada elemento del conjunto de puntos de visión o fijación se aumentará la intensidad del pixel (*i, j*) relacionado con la coordenada (*x, y*) de cada uno de los puntos de datos (Iterando por cada uno de los elementos del conjunto de datos), además, se aumenta el valor de los pixeles alrededor de éste en una menor medida utilizando un valor α que puede ser variable. Para este proceso lo más común es utilizar un kernel gaussiano (Duchowski et al., 2012) el cual dará una mejor visualización a la distribución de calor en el mapa.

$$intensidad\ pixel(i,j) = exp - \frac{(x-i)^2+(y-j)^2}{2\alpha^2} \quad (5)$$

Mientras más alto sea el valor del pixel se le asignará un color más caliente. Finalmente, se procesa el arreglo como una imagen con los colores de temperatura y se coloca sobre la imagen capturada durante la prueba.

3.2 Mapas de rutas

Los mapas de rutas, al igual que los de calor, sirven para representar la atención visual de un usuario o de un conjunto de ellos, se definen como una secuencia de fijaciones alternas y sácadas (Holmqvist et al., 2011). Los elementos visuales de los mapas de rutas son tres: 1) Círculos, los cuales representan una fijación donde el diámetro del círculo indica la duración de la fijación. 2) Enumeración en cada circulo, esto representa la secuencia en el que ocurrieron las fijaciones. Finalmente, 3) El conjunto de vectores, o flechas, que unen los círculos, estos representan los movimientos sacádicos o la ruta que siguieron los ojos para llegar a cada una de las fijaciones (ver Figura 2).

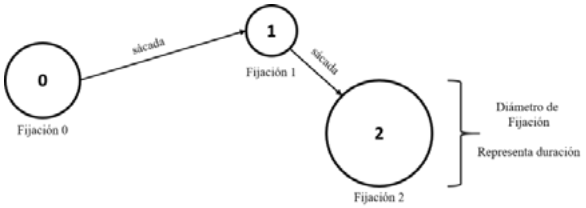


Fig.2. Ejemplo de mapa de rutas y sus elementos.

Para generar el mapa de rutas se procesa el conjunto de puntos de fijación con el objetivo de obtener el conjunto de sácadas. Las sácadas describen un movimiento ocular rápido de una fijación a otra. Suelen durar entre 30 y 80 ms y son el movimiento más rápido que puede realizar el cuerpo humano (Holmqvist et al., 2011). En el mapa de atención, las sácadas representan el movimiento de transición entre dos fijaciones y se describen en un conjunto con cinco elementos (6): El par de coordenadas *x, y* de la primera fijación; El par de coordenadas *x, y* de la segunda fijación; La duración de la sácada *d* en milisegundos.

$$sacada = \{x_1, y_1, x_2, y_2, d\} \quad (6)$$

Una vez obtenido el conjunto de sácadas se procesa la imagen de la prueba para sobreponer los puntos de fijación en orden de aparición con las sácadas que los unen de forma que el par de coordenadas de la primera fijación forma el origen de la flecha y el par de coordenadas de la segunda fijación forma el final del trazo de la flecha.

3.3 Áreas de interés

Otra de las técnicas de visualización de datos del SO son las áreas de interés también conocidas como Áreas de Interés (AOI's). Esta técnica consiste en definir previo a la captura de datos o experimento, las áreas que interesan más a los investigadores, al tener definidas estas secciones se podrá poner mayor atención al comportamiento de los usuarios que las

ISSN en trámite

observan. Ejemplo de esto sería un experimento donde expertos de usabilidad buscan observar si una nueva sección en su página web llama la atención de los usuarios.

Sin embargo, no en todos los estudios se podrán definir áreas de interés de antemano, en estos casos se pueden utilizar métodos de algoritmos de agrupamiento, donde el principio es obtener *n* número de clústeres de forma automática utilizando el conjunto de puntos de visión. Al agruparlos se obtiene de forma dinámica un conjunto de clústeres a los cuales donde el centro de cada clúster representara el centro de un área de interés mientras que los puntos clasificados en el mismo centroide *n* se utilizan para determinar el área que abarca esta región de interés generada dinámicamente. Por ejemplo, la Figura 3 presenta áreas de interés dinámicas generadas a partir de un fotograma y los datos de un usuario al observar una animación de un circulo azul en movimiento.

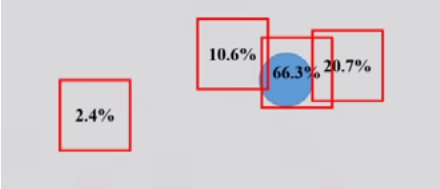


Fig. 3. Ejemplo de áreas de interés dinámicas en una prueba de seguimiento ocular.

Uno de los algoritmos de agrupamiento que obtiene un número dinámico de clústeres de manera automática y que ha sido utilizado para obtener las áreas de interés dinámicas con datos de SO es el algoritmo Meanshift (Comaniciu & Meer, 2002; Fuhl et al., 2018; Santella & DeCarlo, 2004).

Meanshift es un algoritmo de análisis sobre un espacio de características no paramétrico para ubicar los máximos de una función de densidad. Se utiliza comúnmente en el análisis de conglomerados en visión artificial y procesamiento de imágenes. Este algoritmo encuentra las modas de una función de densidad a partir de una muestra de datos (Yizong Cheng, 1995). Es un método iterativo que utiliza un kernel (comúnmente gaussiano) para tratar de converger el resultado de la media dependiendo del peso de los puntos vecinos.

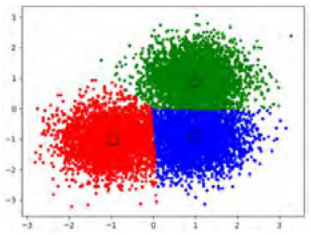


Fig. 4. Ejemplo de resultado del algoritmo Meanshift para un conjunto de datos (scikit-learn, 2021)

3.4 Visualización de otros datos del seguimiento ocular

Aunque no todos los datos del SO pueden ser representados de manera visual para su análisis, estos pueden ser interpretados para obtener información acerca del comportamiento de los usuarios. La Tabla 1 muestra una recopilación de características del SO, relacionadas con patrones de comportamiento humano que pueden ser extraídas de los datos de Fijaciones, Sácadas, Parpadeos, Pupila y de los Movimientos oculares en general. A continuación, se discutirá como pueden ser utilizados algunos de estos datos para interpretar el comportamiento humano durante las pruebas de SO.

Tabla 1. Características del seguimiento ocular

Fijaciones	Puntos, Duración, Conteo, Tiempo total, Tiempo de enfoque, Primera fijación, Primera fijación en AOI, Latencia
Sácadas	Rutas, Duración, Conteo, Tiempo total, Velocidad, Amplitud, Tamaño, Latencia
Pupila	Diámetro, Tasa de cambio, Promedio Tamaño máximo, Tamaño mínimo, Varianza
Parpadeos	Frecuencia, Duración Conteo, Distancia entre parpados, Tiempo con ojos cerrados, Tiempo con ojos abiertos
Movimientos oculares	Dirección de la visión, Forma del iris, Posición de los parpados, Posición de las cejas, Conteo de vistazos

La duración de una fijación describe problemas relacionados a la extracción de información o indica que el estímulo es más atractivo para el usuario. El número de fijaciones puede indicar que tan efectiva es la búsqueda de algún objeto dentro de algún escenario, tener que un menor número de fijaciones hasta el objetivo demuestra una búsqueda más fácil. Las fijaciones que se concentren en un área pequeña o en un objetivo particular también pueden indicar enfoque de parte del usuario. El tiempo de enfoque de un usuario se mide como el tiempo gastado en la misma posición y área, esto nos indica que tanta atención tiene el usuario al aparecer un estímulo nuevo. El tiempo que transcurre entre un estímulo y la primera fijación del usuario puede indicar que tan llamativo es el estímulo para la persona.

Para los parpadeos se puede observar la frecuencia del parpadeo que está ligada con el estado mental del usuario. La duración del parpadeo y el número de parpadeos durante un periodo de tiempo se relacionan con el nivel de atención. El tiempo gastado con los ojos cerrados y la distancia máxima entre los párpados son algunas otras características que han ayudado a investigadores a diferenciar entre grupos de personas en trabajos del estado del arte.

Cualquier cambio en la pupila está relacionado con el estado mental del usuario resultado de la interacción con cualquier tipo de estímulo emocional o cognitivo. Sin embargo, como se mencionó antes, los datos de la pupila deben ser capturados

ISSN en trámite

controlando las condiciones ambientales (luz, temperatura, flujo de aire, etc.).

Los datos relacionados con las sácadas se relacionan con que tan eficiente y difícil es la búsqueda de información u objetivos para el usuario, teniendo en cuenta que mientras más amplias o mayor sea el número de sácadas en un periodo de interacción de un estímulo, más difícil fue la interacción del usuario.

En relación con las áreas de interés, cuando existen más fijaciones en un área de interés especifica significa que es más atractiva para los usuarios, además se puede calcular la frecuencia del cambio de atención dividiendo el número total de cambios de atención entre un conjunto de áreas de interés por minuto.

4. APLICACIONES

Actualmente el análisis de los datos del seguimiento ocular brinda información relevante a las reacciones o interacciones de los usuarios. Esta información es interpretada de distintas maneras para distintos campos de investigación. Por ejemplo, para la interacción humano-computadora (HCI), los patrones del movimiento ocular pueden ser utilizados como disparadores para sistemas inteligentes e interfaces de usuario. En el computo afectivo se puede hacer uso de la información ocular para tomar decisiones en función de la carga emocional de los contenidos que observan los usuarios o alumnos en entornos de aprendizaje virtual. Para las investigaciones relacionadas en la experiencia de usuario (UX), el análisis del SO permite obtener información objetiva sobre la atención y gustos de los usuarios. Dentro de la lingüística computacional el SO se utiliza para comprender como los usuarios observan y procesan los lenguajes multisemióticos (Parodi & Julio, 2016).

En el campo de la medicina y la psiquiatría, los patrones de movimientos oculares irregulares pueden ser utilizados para diferencias distintos padecimientos en los pacientes. Esto se puede lograr al entrenar algoritmos de aprendizaje maquina con los datos de una muestra de personas sanas en conjunto con una muestra de personas que sufran algún padecimiento como: depresión, ansiedad, autismo, entre otras.

Otras aplicaciones interesantes se encuentran en tareas que requieren de concentración y atención, por ejemplo: La conducción de vehículos inteligentes que detectan el estado de los operadores con el fin de evitar accidentes causados por la falta de atención o la somnolencia (McIntire et al., 2014; Smith et al., 2003; Yamada & Kobayashi, 2018); Tareas de vigilancia de altas prioridades como el control de tráfico aéreo (Martin et al., 2011); Y en el análisis de contenidos en los videojuegos así como su carga cognitiva (Lagunes-Ramírez et al., 2020; Mallick et al., 2016).

5. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos a partir del SO son una forma objetiva y útil para observar el comportamiento humano el cual puede aportar pistas y patrones relevantes para muchos campos de la investigación. Por ejemplo, actualmente se están investigando modelos de comportamiento ocular en personas con enfermedades mentales con el objetivo de diagnosticar de manera objetiva casos de depresión o ansiedad. Además, los investigadores han usado esta información para investigar la implementación de técnicas que cambian el comportamiento visual para tratar los mismos problemas mentales. Los resultados preliminares han demostrado que cambiar el comportamiento visual de una persona puede reducir los síntomas de enfermedades mentales (Hsu et al., 2018; Vazquez et al., 2016). Al considerar todo el potencial del análisis del SO, los investigadores podrán aprovechar al máximo los datos de pruebas de SO y obtendrán un mejor contexto para trabajos futuros.

Para realizar un estudio de seguimiento ocular se recomienda utilizar un ambiente de pruebas controlado en un laboratorio donde el sujeto de pruebas esté libre de distractores y sea posible controlar el ruido, temperatura y nivel de iluminación.

REFERENCIAS

Balkenius, C., Fawcett, C., Falck-Ytter, T., Gredeback, G., & Johansson, B. (2019). Pupillary Correlates of Emotion and Cognition: A Computational Model. *2019 9th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, 903–907. https://doi.org/10.1109/NER.2019.8717091

Borys, M., & Małgorzata, P.-W. (2017). Eye-tracking metrics in perception and visual attention research. *European Journal of Medical Technologies*, *3*(16), 11–23.

Comaniciu, D., & Meer, P. (2002). Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *24*, 603–619.

Duchowski, A. T., Price, M. M., Meyer, M., & Orero, P. (2012). Aggregate gaze visualization with real-time heatmaps. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications - ETRA '12*, 13. https://doi.org/10.1145/2168556.2168558

Fogarty, C., & Stern, J. A. (1989). Eye movements and blinks: their relationship to higher cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, *8*(1), 35–42. https://doi.org/10.1016/0167-8760(89)90017-2

Fuhl, W., Kuebler, T., Brinkmann, H., Rosenberg, R., Rosenstiel, W., & Kasneci, E. (2018). Region of interest generation algorithms for eye tracking data. *Proceedings of the 3rd Workshop on Eye Tracking and Visualization - ETVIS '18*, 1–9. https://doi.org/10.1145/3205929.3205937

Gazepoint. (2021). *GP3 Eye-Tracker*.

Gerdes, A. B. M., Alpers, G. W., Braun, H., Köhler, S., Nowak, U., & Treiber, L. (2020). Emotional sounds guide visual attention to emotional pictures: An eye-tracking study with audio-visual stimuli. *Emotion*.

ISSN en trámite

https://doi.org/10.1037/emo0000729

Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Halszka, J., & van de Weijer, J. (2011). *Eye Tracking : A Comprehensive Guide to Methods and Measures*. Oxford University Press.

Hsu, K. J., Caffey, K., Pisner, D., Shumake, J., Risom, S., Ray, K. L., Smits, J. A. J., Schnyer, D. M., & Beevers, C. G. (2018). Attentional bias modification treatment for depression: Study protocol for a randomized controlled trial. *Contemporary Clinical Trials*, *75*, 59–66. https://doi.org/10.1016/j.cct.2018.10.014

Kosch, T., Hassib, M., Buschek, D., & Schmidt, A. (2018). Look into my Eyes: Using Pupil Dilation to Estimate Mental Workload for Task Complexity Adaptation. *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*, 1–6. https://doi.org/10.1145/3170427.3188643

Lagunes-Ramírez, D., Gonzalez-Serna, G., Lopez-Sanchez, M., Fragoso-Diaz, O., Castro-Sanchez, N., & Olivares-Rojas, J. (2020). Study of the User's Eye Tracking to Analyze the Blinking Behavior While Playing a Video Game to Identify Cognitive Load Levels. *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/ROPEC50909.2020.9258693

Li, M., Cao, L., Zhai, Q., Li, P., Liu, S., Li, R., Feng, L., Wang, G., Hu, B., & Lu, S. (2020). Method of Depression Classification Based on Behavioral and Physiological Signals of Eye Movement. *Complexity*, *2020*, 1–9. https://doi.org/10.1155/2020/4174857

Lu, Y., Zheng, W.-L., Li, B., & Lu, B.-L. (2015). Combining Eye Movements and EEG to Enhance Emotion Recognition. *Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence*, 1170–1176. http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2832249.2832411

Mallick, R., Slayback, D., Touryan, J., Ries, A. J., & Lance, B. J. (2016). The use of eye metrics to index cognitive workload in video games. *2016 IEEE Second Workshop on Eye Tracking and Visualization (ETVIS)*, 60–64. https://doi.org/10.1109/ETVIS.2016.7851168

Martin, C., Cegarra, J., & Averty, P. (2011). *Analysis of Mental Workload during En-route Air Traffic Control Task Execution Based on Eye-Tracking Technique* (pp. 592–597). https://doi.org/10.1007/978-3-642-21741-8_63

McIntire, L. K., McKinley, R. A., Goodyear, C., & McIntire, J. P. (2014). Detection of vigilance performance using eye blinks. *Applied Ergonomics*, *45*(2), 354–362. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.020

Mitre-Hernandez, H., Covarrubias-Carrillo, R., & Lara-Alvarez, C. (2020). Pupillary Responses for Cognitive Load Measurement: Classifying Difficulty Levels in an Educational Video Game (Preprint). *JMIR Serious Games*. https://doi.org/10.2196/21620

Parodi, G., & Julio, C. (2016). ¿Dónde se posan los ojos al leer textos multisemióticos disciplinares? Procesamiento de palabras y gráficos en un estudio experimental con eye tracker. *Revista Signos*, *49*, 149–183. https://doi.org/10.4067/S0718-09342016000400008

Pfleging, B., Fekety, D. K., Schmidt, A., & Kun, A. L. (2016). A Model Relating Pupil Diameter to Mental Workload and Lighting Conditions. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 5776–5788. https://doi.org/10.1145/2858036.2858117

Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications - ETRA '00*, 71–78. https://doi.org/10.1145/355017.355028

Santella, A., & DeCarlo, D. (2004). Robust clustering of eye movement recordings for quantification of visual interest. *Proceedings of the Eye Tracking Research & Applications Symposium on Eye Tracking Research & Applications - ETRA'2004*, 27–34. https://doi.org/10.1145/968363.968368

scikit-learn. (2021). *A demo of the mean-shift clustering algorithm*. https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/cluster/plot_mean_shift.htm

Smith, P., Shah, M., & Lobo, N. da V. (2003). Determining driver visual attention with one camera. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *4*(4), 205–218. https://doi.org/10.1109/TITS.2003.821342

Stern, J. A., Walrath, L. C., & Goldstein, R. (1984). The Endogenous Eyeblink. *Psychophysiology*, *21*(1), 22–33. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1984.tb02312.x

Tobii. (2017). *Tobii 4C*.

Vazquez, C., Blanco, I., Sanchez, A., & McNally, R. J. (2016). Attentional bias modification in depression through gaze contingencies and regulatory control using a new eye-tracking intervention paradigm: study protocol for a placebo-controlled trial. *BMC Psychiatry*, *16*(1), 439. https://doi.org/10.1186/s12888-016-1150-9

Yamada, Y., & Kobayashi, M. (2018). Detecting mental fatigue from eye-tracking data gathered while watching video: Evaluation in younger and older adults. *Artificial Intelligence in Medicine*. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2018.06.005

Yizong Cheng. (1995). Mean shift, mode seeking, and clustering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *17*(8), 790–799. https://doi.org/10.1109/34.400568

Zagermann, J., Pfeil, U., & Reiterer, H. (2018). Studying Eye Movements as a Basis for Measuring Cognitive Load. *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–6. https://doi.org/10.1145/3170427.3188628

ISSN en trámite

Métricas de Tolerancia a fallas: una taxonomía para sistemas Big Data

Nancy V. Guadarrama-Alvarez *, Juan C. Rojas-Peréz *, Olivia G. Fragoso-Diaz *, Humberto Hernández-García*

** Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos México (Tel: +52 777 3637770; e-mail: m21ce014@cenidet.tecnm.mx, juan.rp@cenidet.tecnm.mx, olivia.fd@cenidet.tecnm.mx, humberto.hg@cenidet.tecnm.mx).*

Resumen: En la actualidad Big Data está ganando popularidad como herramienta para procesar grandes volúmenes de datos en diferentes formatos, generados a partir de diversas fuentes de información. Big Data como herramienta para procesar información no está exenta de problemas, uno de estos problemas es la tolerancia a fallas. Varios trabajos han abordado la tolerancia a fallas desde diversas perspectivas lo que lo hace difícil de tratar, a la fecha no existe un consenso de qué atributos de calidad tomar en cuenta y cómo medir estos atributos. Este trabajo tiene como objetivo determinar que atributos de calidad son necesarios para abordar la tolerancia a fallas y como medir estos atributos, de tal manera que nos permitan determinar el estatus de un sistema Big Data. En este trabajo se presenta una taxonomía para la tolerancia a fallas conformada por métricas, las cuales servirán como medio para medir la capacidad de tolerancia a fallas de un sistema Big Data.

Palabras clave: Big data, sistemas tolerantes a fallas, software, métricas, confiabilidad

1. INTRODUCCIÓN

Big Data se refiere a volúmenes masivos y complejos de información estructurada y no estructurada (Arcila-Calderón, Barbosa-Caro and Cabezuelo-Lorenzo, 2016) como audios, videos, páginas web y textos (Raguseo, 2018). Se caracteriza por tamaños más allá de la capacidad de las herramientas de software de uso común para capturar, curar, administrar y procesar datos dentro de un tiempo transcurrido tolerable (Salma, Tekinerdogan and Athanasiadis, 2016). Big Data está ganando más popularidad como herramienta para analizar cantidades significativas de datos bajo demanda (Alkatheri, Abbas and Siddiqui, 2019), los cuales son generados a partir de diversas fuentes como redes sociales, Internet de las cosas y aplicaciones multimedia (Mohamed *et al.*, 2020).

Big Data al igual que otras áreas de investigación presenta algunos desafíos. En la práctica existen problemas como la alta escalabilidad, la tolerancia a fallas, la flexibilidad, la confiabilidad y la comprobabilidad, que pueden ser considerados en términos de la Ingeniería de Software. En este trabajo se aborda la tolerancia a fallas desde la perspectiva de medir cualitativa o cuantitativamente para determinar el estatus de un sistema que adolece de fallas, y de acuerdo con esta evaluación una organización podrá proponer e implementar estrategias que permitan la mejora del proceso de construcción de software (Callejas-Cuervo, Alarcón-Aldana and Álvarez-Carreño, 2017). La tolerancia a fallas se define como: la capacidad de un sistema o componente para continuar su funcionamiento normal (ejecución correcta de sus programas y funciones de entrada/salida) a pesar de la presencia de fallas de hardware o software. De manera similar, apunta a mantener la entrega de servicios correctos en la existencia de fallas activas (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009). En este trabajo se considera la tolerancia a fallas un problema cuando un sistema de software adolece de esta característica o los mecanismos utilizados para la tolerancia a fallas no son los adecuados o suficientes para atender esta cualidad. Para abordar el problema de la tolerancia a fallas se han propuesto diversas soluciones. Hasta la presente investigación no hay un consenso en cuanto a que atributos se requieren para medir la tolerancia a fallas y como medir estos atributos. En este trabajo se presenta una taxonomía para la tolerancia a fallas, conformada por métricas cualitativas (técnicas de tolerancia a fallas) y cuantitativas (atributos de calidad: disponibilidad, rendimiento, mantenibilidad, testeabilidad, y sus respectivas métricas).

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Dentro de los trabajos relacionados se identificaron dos enfoques, el de atributos y el de técnicas de tolerancia a fallas.

1) **Atributos relacionados a tolerancia a fallas**

Diversos estudios han abordado la problemática de la tolerancia a fallas, por ser una necesidad latente. Sin embargo, actualmente no hay un modelo que plantee las características

ISSN en trámite

específicas y concretas relacionadas a la capacidad de tolerancia a fallas de un sistema Big Data. En el trabajo de (Cao and Gao, 2018), los autores refieren 6 fallas principales que ocurren en un sistema Big Data: 1) Falla de hardware, 2) Defecto de código, 3) Limitación de diseño del sistema, 4) Falla de operación, 5) Mala configuración y falla del software de aplicación, que a su vez, de acuerdo a los autores, involucran 66 eventos de falla básicos.

En (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009) los autores realizaron un método sistemático que consistió en comparar definiciones, atributos y métricas para 5 conceptos ampliamente utilizados, entre ellos la tolerancia a fallas. Más recientemente, en (Zhang *et al.*, 2017), se describe el uso de la tolerancia a fallas para garantizar la calidad de las aplicaciones Big Data y se introducen propiedades y atributos de calidad.

Respecto a métricas, el trabajo (Nuñez-Varela *et al.*, 2017) realizó un mapeo sistemático que obtuvo alrededor de 300 métricas de código fuente y programación orientada a objetos (OOP), clasificadas en 27 categorías entre ellas: rendimiento, seguridad, confiabilidad, mantenibilidad, refactorización, etc. En (Singhani and Suri, 2015) los autores proponen un modelo de evaluación de la testeabilidad basado en factores de calidad externos y su relación con las características internas de la OOP que la afectan.

2) **Técnicas de tolerancia a fallas**

En cuanto a los trabajos relacionados con técnicas de tolerancia usadas en sistemas Big Data, el trabajo de (Yu and Buyya, 2005) propone clasificar las técnicas de manejo de fallas en dos niveles: 1) Nivel tarea, donde se enmascaran las fallas y 2) Nivel flujo de trabajo, donde se manipulan los flujos de trabajo y de ejecución para tratar las condiciones erróneas. En el trabajo de (Neves *et al.*, 2016), los autores concluyen que Big Data y la computación en la nube son conceptos compatibles, por lo que para esta investigación se consideran técnicas de tolerancia de ambos tipos de desarrollos. Con esto en mente, en (Hasan and Goraya, 2018) se clasifican en dos los enfoques de la tolerancia a fallas: 1) Proactiva y 2) Reactiva, además se indican las técnicas que se han adoptado para implementar tolerancia a fallas, y se sugiere que la replicación es el método más utilizado por la mayoría de los sistemas de nube actuales. En (Mukwevho and Celik, 2021) los autores refieren que los métodos tradicionales, clasificados en proactivos y reactivos, tienen limitaciones debido a que se basan en una lógica fija y manejan fallas específicas por lo que carecen de la capacidad de manejar nuevos escenarios. También hacen una consideración a atributos ambientales que pueden afectar el rendimiento (temperatura, energía y clima) por lo que consideran como parte de su clasificación las técnicas resilientes. De igual forma (Shahid *et al.*, 2021) concluye que la técnica de punto de control (checkpoint) tiene el mayor porcentaje de uso. Sin embargo, se ha identificado que las técnicas de tolerancia a fallas más utilizadas en la literatura (Kasu, Hamandawana and Chung, 2021), (Wu *et al.*, 2017), (Fang, Chen and Xiong, 2019), (Saadoon *et al.*, 2021), (Poola *et al.*, 2017) son: 1) Punto de control, 2) Redundancia, 3) Replicación, 4) Rollback y 5) Recuperación.

Se observó, que los trabajos relacionados a la tolerancia a fallas específicamente orientados a sistemas de software Big Data son limitados y no existe un acuerdo común que determine la forma adecuada de medir este atributo de calidad tan importante. Para poder cubrir la necesidad de evaluar la tolerancia a fallas en los sistemas Big Data. Este trabajo presenta una taxonomía, estructurada por atributos de calidad relacionados a tolerancia a fallas y técnicas de tolerancia a fallas en forma de métricas cuantitativas, pero de manera diferenciada, para abordar el problema.

3. TAXONOMÍA DE TOLERANCIA A FALLAS EN SISTEMAS BIG DATA

Una taxonomía es una colección de términos de un vocabulario controlado, organizados en una estructura jerárquica (Blas, Gonnet and Leone, 2014). Cada termino en una taxonomía está en una o más relaciones padre-hijo de otros términos de la taxonomía, las buenas prácticas limitan a que todas las relaciones padre-hijo tengan un único padre que sea del mismo tipo. Una taxonomía de atributos de calidad (AC) se denomina modelo de calidad (MC). Un MC sirve como marco de trabajo para la especificación, evaluación y testeo de la calidad de un Sistema (Blas, Gonnet and Leone, 2014).

La taxonomía que se presenta en este trabajo es una propuesta, resultado de la revisión y análisis de soluciones planteadas en los trabajos relacionados que abordan la problemática de la tolerancia a fallas. En la Figura 1 se presentan las tres etapas secuenciales que conformaron el proceso.

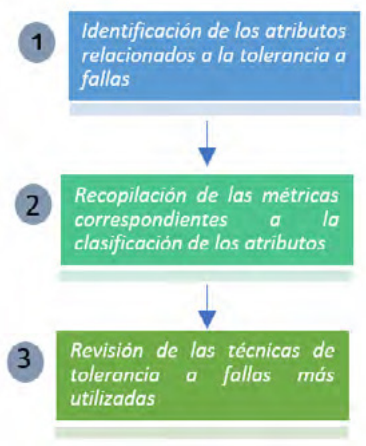


Fig. 1. Proceso de elaboración de la taxonomía.

ISSN en trámite

Las secciones siguientes describen las tres etapas del desarrollo de la taxonomía de tolerancia a fallas en sistemas Big Data.

3.1 Identificación de los atributos relacionados a la tolerancia a fallas

Un atributo de calidad (AC) es una caracterización o propiedad específica de un sistema de software que puede tomar un valor cuantitativo o cualitativo, el cual es medible u observable (Blas, Gonnet and Leone, 2014). De acuerdo a la literatura y como resultado de esta etapa para el atributo Tolerancia a Fallas, se consideran los sub-atributos: 1)***Disponibilidad*** (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009), (Zhang *et al.*, 2017), (Elattar *et al.*, 2016); 2)***Rendimiento*** o capacidad de ejecución (Zhang *et al.*, 2017), (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009); 3)***Mantenibilidad*** o capacidad de mantenimiento (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009) y 4)***Testeabilidad*** o capacidad de prueba (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009), (Singhani and Suri, 2015)**.** Debido a que afectan directamente a la tolerancia a fallas. En la Tabla 1, se describen estos sub-atributos de calidad.

Tabla 1. Sub-atributos relacionados a tolerancia a fallas.

Sub-atributo	Descripción
Disponibilidad	El grado en que un sistema o componente es operativo y accesible cuando se requiere para su uso (ISO, IEC and IEEE, 2010).
Rendimiento	El grado en que un sistema o componente cumple sus funciones designadas dentro de determinadas restricciones (Zhang *et al.*, 2017).
Mantenibilidad	Es la rapidez ('IEEE Standard Dictionary of Measures of the Software Aspects of Dependability', 2006) y facilidad con la que un sistema o componente puede modificarse para corregir fallas, mejorar el rendimiento u otros atributos, o adaptarse a un entorno modificado (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009), (ISO, IEC and IEEE, 2010).
Testeabilidad	Grado en que se puede diseñar una prueba objetiva y factible para determinar si se cumple un requisito (ISO, IEC and IEEE, 2010).

3.2 Recopilación de las métricas correspondientes a la clasificación de los atributos

Los sub-atributos de calidad relacionados a la tolerancia a fallas descritos anteriormente pueden medirse en función de métricas desde las perspectivas de las etapas del ciclo de vida del software, por ejemplo: En el código fuente, donde se evalúa la estructura del desarrollo y sus valores permiten obtener conclusiones sobre los atributos medidos (Nuñez-Varela *et al.*, 2017); y la etapa de mantenimiento, donde podrían observarse fallas durante la ejecución del sistema que podríamos medir en términos de tiempo promedio de fallas.

Las métricas utilizadas para medir los siguientes sub-atributos de calidad relacionados a tolerancia a fallas: 1) Disponibilidad, 2) Rendimiento, 3) Mantenibilidad y 4) Testeabilidad se listan a continuación:

Métricas de (OOP) utilizadas para medir los atributos de rendimiento, mantenibilidad y testeabilidad: Nivel de abstracción (A), Factor de ocultación de atributos (AHF), Acoplamientos aferentes (Ca), Acoplamiento entre objetos (CBO), Acoplamientos eferentes (Ce), Acoplamiento de abstracción de datos (DAC), Profundidad del árbol de herencia (DIT), Distancia normalizada desde la secuencia principal (Dn), Esfuerzo (E), Inestabilidad (I), Falta de cohesión en los métodos (LCOM), Falta de cohesión en los métodos 2 (LCOM2), Falta de cohesión en los métodos 3 (LCOM3), Líneas de comentarios (LCOMM), Número de líneas de código (LOC), Factor de ocultación del método (MHF), Acoplamiento de paso de mensajes (MPC), Número de métodos anulados (NMO), Nivel de anidamiento (NEST), Número de atributos (NOA), Número de bloques de captura (NOC), Número de métodos (NOM), Número de atributos públicos (NOPA), Número de métodos públicos (NOPM), Número de parámetros (NPAR), Fan-In (FANIN), Fan-Out (FANOUT), Respuesta para una clase (RFC), Líneas de código fuente (SLOC), Número de estados de cuenta (STAT), Complejidad Ciclomática McCabe (V(G)), Métodos ponderados por clase (WMC) (Nuñez-Varela *et al.*, 2017), (Singhani and Suri, 2015), (Al-Kuwaiti, Kyriakopoulos and Hussein, 2009).

Métricas para medir el atributo de disponibilidad: Tiempo medio hasta el fallo (MTTF), Tiempo estimado o promedio para reparar (MTTR), Tiempo medio entre fallos (MTBF) (ISO, IEC and IEEE, 2010).

En (Nuñez-Varela *et al.*, 2017) se destacan las 10 métricas más utilizadas y/o estudiadas a lo largo del tiempo para la tolerancia a fallas son : CBO, DIT, LCOM, LOC, NOA, NOC, NOM, RFC, V(G) Y WMC.

Derivado de la recopilación de las métricas correspondientes a los 4 atributos de calidad, en la Tabla 2, se presenta la clasificación de las métricas relacionadas a cada uno de los atributos que componen la tolerancia a fallas.

3.3 Revisión de las técnicas de tolerancia a fallas más utilizadas

En vista de que el almacenamiento tradicional no es capaz de manejar Big Data, y aunque Big Data resuelve gran parte de nuestros problemas actuales, todavía presenta algunas lagunas y problemas que generan preocupación y necesitan mejoras. Para poder cumplir con los requisitos actuales de los sistemas Big

ISSN en trámite

Data, es decir: 1) Ser disponibles, 2) Ser tolerantes a fallas, 3) Ser escalables y 4) Ser flexibles, es necesario utilizar técnicas de tolerancia a fallas (Zanoon, Al-Haj and Khwaldeh, 2017).

Tabla 2. Clasificación de las métricas relacionadas a los sub-atributos que miden la tolerancia a fallas.

No.	Métrica	SUB-ATRIBUTOS DE CALIDAD RELACIONADOS A MEDIR A TOLERANCIA A FALLAS					
			Rendimiento				
		Mantenibilidad	Predecir los resultados de la compilación de software	Rendimiento del software	Eficiencia del código	Testeabilidad (Capacidad de prueba)	Disponibilidad
1	A	●	●				
2	AHF				●		
3	Ca	●	●				
4	CBO	●			●	●	
5	Ce	●	●				
6	DAC	●					
7	DIT	●	●	●	●	●	
8	Dn	●	●				
9	E	●	●				
10	I	●	●				
11	LCOM	●	●			●	
12	LCOM2		●				
13	LCOM3		●				
14	LCOMM	●	●				
15	LOC	●	●		●		
16	MHF				●		
17	MPC	●					
18	NMO	●				●	
19	NEST		●				
20	NOA		●	●			
21	NOC	●		●	●		
22	NOM	●	●	●		●	
23	NOPA	●					
24	NOPM	●		●			
25	NPAR		●				
26	FANIN			●			
27	FANOUT			●			
28	RFC	●			●		
29	SLOC	●					
30	STAT	●					
31	V(G)	●	●		●		
32	WMC	●	●		●	●	
33	MTTF						●
34	MTTR						●
35	MTBF						●

Debido a que Big Data y computación en la nube son conceptos compatibles (Neves *et al.*, 2016), ya que las características de los últimos se relacionan con las propiedades de: volumen, variedad, y variabilidad (Alkatheri, Abbas and Siddiqui, 2019) de los datos, propiedades presentes igualmente en un sistema Big Data, también el computo en la nube permite que los sistemas estén disponibles, sean escalables y tolerantes a fallas. Como resultado de la investigación, además de considerar técnicas de tolerancia a fallas específicas de Big Data se incluyen técnicas aplicadas en sistemas en la nube (Shahid *et al.*, 2021), (Hasan and Goraya, 2018), con el propósito de ampliar la capacidad de disponibilidad.

En la Tabla 3, se muestran las tres ***categorías principales de técnicas de tolerancia a fallas***, métodos reactivos; métodos proactivos y métodos resilientes. Y se listan las técnicas que serán consideradas para medir la tolerancia a fallas en sistemas Big Data.

Tabla 3. Enfoques de la tolerancia a fallas.

	Descripción
Reactivo	Los enfoques reactivos de tolerancia a fallas manejan las fallas después de su ocurrencia (Hasan and Goraya, 2018), el énfasis está principalmente en la recuperación del sistema (Shahid *et al.*, 2021) p. ej.: Punto de control, Replicación, Reintentar, Reenvío de tareas, Manejo de excepciones personalizado, Flujo de trabajo de rescate, Balanceo de carga, N-versión y recuperación.
Proactivo	Se define como la capacidad del sistema para estar en un estado preparado o controlado para manejar las posibles interrupciones antes de que ocurran (Hasan and Goraya, 2018) p. ej.: Rejuvenecimiento de software, Autocuración, Migración preventiva, Predicción, Supervisión/Monitoreo, SGuard.
Resiliente	Funcionan prediciendo fallas e implementando métodos para evitar o mitigar el impacto de dichas fallas en el Sistema (Mukwevho and Celik, 2021) p. ej.: Aprendizaje automático, Inducción a fallas.

Durante la investigación se identificó que la orientación futura sobre la tolerancia a fallas en la nube avanza hacia técnicas inteligentes y resilientes, numerosos estudios de tolerancia a fallas ya han implementado el aprendizaje automático (Shahid *et al.*, 2021) para presentar inteligencia y resiliencia en un enfoque de detección automático (Mukwevho and Celik, 2021).

En la Figura 2, se presenta la taxonomía que puede ser utilizada para medir la tolerancia a fallas en sistemas Big Data. Esta se compone de atributos de calidad y técnicas de tolerancia a fallas.

ISSN en trámite

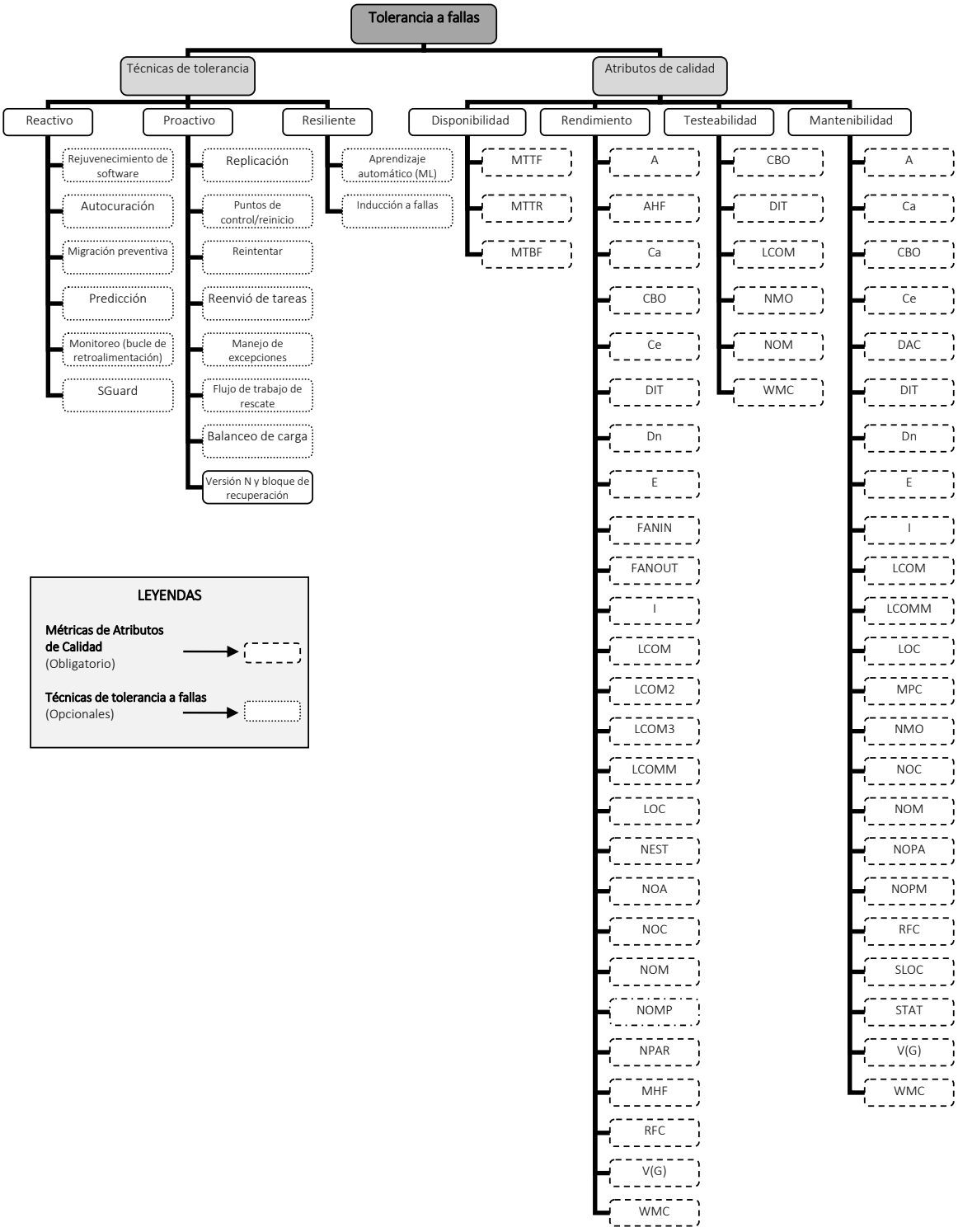


Fig. 2. Taxonomía de tolerancia a fallas en Big Data.

ISSN en trámite

La Tabla 4 presenta las métricas Atributos de Calidad Relacionados o ACR representada en ecuación (1), y Técnicas de Tolerancia a Fallas o TTF en ecuación (2), para obtener el valor de la tolerancia a fallas en sistemas Big Data según la taxonomía propuesta.

Tabla 4. Métricas para determinar la tolerancia a fallas de un Sistema Big Data.

	Fórmula	
Métricas	$ACR = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{n} D_n}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n} R_n}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n} M}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n} T}{n}}{4}$	(1)
	$TTF = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{n} TP_n}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n} TR_n}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n} TRS}{n}}{3}$	(2)

Nota: ***D****= Disponibilidad,* ***R****= Rendimiento,* ***M****= Mantenibilidad,* ***T****= Testeabilidad,* ***TR****= Técnicas Reactivas,* ***TP****= Técnicas Proactivas,* ***TRS****= Técnicas Resilientes*

Los sub-atributos de calidad presentados: 1) Disponibilidad, 2) Rendimiento, 3) Mantenibilidad y 4) Testeabilidad, determinarán el grado total de cumplimiento presente en el atributo, cabe resaltar que al realizar pruebas para validar la taxonomía serán consideradas todas y cada una de las métricas del grupo atributos de calidad relacionados a tolerancia a fallas especificadas, y para el caso de las técnicas de tolerancia a fallas que están agrupadas por enfoques: reactivo, proactivo y resiliente, se propone que si existe la técnica se otorgue un valor numérico o cuantitativo, por ejemplo, si la técnica existe se otorgue un valor de 1, y si no existe se otorgue un valor de 0.

4. CONCLUSIONES

Los desarrollos Big Data, son actualmente una herramienta popular, que tiene la capacidad de procesar gran cantidad de información. Sin embargo, en el proceso de investigación no se encontraron aportaciones orientadas a proponer una forma consensada de medir la tolerancia a fallas en software Big Data. Este trabajo propone una taxonomía para medir la tolerancia a fallas en dichos sistemas, en conclusión, el trabajo expuesto sirve como punto de partida y se plantea resolver esta problemática mediante atributos de calidad y técnicas de tolerancia a fallas, identificados en la literatura utilizados comúnmente.

Como parte de trabajo futuro, se propone realizar pruebas para validar la taxonomía propuesta para la tolerancia a fallas en sistemas Big Data sobre un caso de estudio real y presentar los resultados obtenidos.

La taxonomía presentada es una propuesta, y será aplicada a sistemas Big Data. El alcance de este trabajo, por el momento, no permite determinar a qué tipos de sistemas Big Data o que tipos de datos puede ser aplicable. Se espera abordar en trabajos futuros estas características.

REFERENCIAS

Al-Kuwaiti, M., Kyriakopoulos, N. and Hussein, S. (2009) 'A comparative analysis of network dependability, fault-tolerance, reliability, security, and survivability', *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(2), pp. 106–124. doi:10.1109/SURV.2009.090208.

Alkatheri, S., Abbas, S. and Siddiqui, M. (2019) 'A Comparative Study of Big Data Frameworks', *International Journal of Computer Science and Information Security,* 17.

Arcila-Calderón, C., Barbosa-Caro, E. and Cabezuelo-Lorenzo, F. (2016) 'Técnicas big data: análisis de textos a gran escala para la investigación científica y periodística', *Profesional de la Información*, 25(4), pp. 623–631. doi:10.3145/epi.2016.jul.12.

Blas, M.J., Gonnet, S. and Leone, H. (2014) 'Una Taxonomía de Atributos de Calidad para la Evaluación de Arquitecturas de Software por medio de Simulación', in *Conference: 2° CoNaIISI Congreso Nacional de Ingeniería en Informática / Sistemas de Información[1] M. J. Blas, S. Gonnet, and H. Leone, "Una Taxonomía de Atributos de Calidad para la Evaluación de Arquitecturas de Software por medio de Simulación," 2014.* doi:10.13140/2.1.5067.8560.

Callejas-Cuervo, M., Alarcón-Aldana, A.C. and Álvarez-Carreño, A.M. (2017) 'Modelos de calidad del software, un estado del arte', *ENTRAMADO*, 13(1), pp. 236–250. doi:10.18041/entramado.2017v13n1.25125.

Cao, R. and Gao, J. (2018) 'Research on reliability evaluation of big data system', in *2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA)*. IEEE, pp. 261–265. doi:10.1109/ICCCBDA.2018.8386523.

Elattar, M. *et al.* (2016) 'Potential of multipath communications to improve communications reliability for internet-based cyberphysical systems', in *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1–8.

Fang, Y., Chen, Q. and Xiong, N. (2019) 'A multi-factor monitoring fault tolerance model based on a GPU cluster for big data processing', *Information Sciences*, 496, pp. 300–316. doi:10.1016/j.ins.2018.04.053.

Hasan, M. and Goraya, M.S. (2018) 'Fault tolerance in cloud computing environment: A systematic survey', *Computers in Industry*, 99, pp. 156–172. doi:10.1016/j.compind.2018.03.027.

'IEEE Standard Dictionary of Measures of the Software Aspects of Dependability' (2006) *IEEE Std 982.1-2005 (Revision of IEEE Std 982.1-1988)*, pp. 1–41. doi:10.1109/IEEESTD.2006.215280.

ISO, IEC and IEEE (2010) *Systems and software engineering—Vocabulary ISO/IEC/IEEE 24765: 2010*, *Iso/Iec/Ieee*.

Kasu, P., Hamandawana, P. and Chung, T.-S. (2021) 'DLFT: Data and Layout Aware Fault Tolerance Framework for Big Data Transfer Systems', *IEEE Access*, 9, pp. 22939–22954.

ISSN en trámite

Mohamed, A. *et al.* (2020) 'The state of the art and taxonomy of big data analytics: view from new big data framework', *Artificial Intelligence Review*, 53(2), pp. 989–1037. doi:10.1007/s10462-019-09685-9.

Mukwevho, M.A. and Celik, T. (2021) 'Toward a Smart Cloud: A Review of Fault-Tolerance Methods in Cloud Systems', *IEEE Transactions on Services Computing*, 14(2), pp. 589–605. doi:10.1109/TSC.2018.2816644.

Neves, P.C. *et al.* (2016) 'Big Data in Cloud Computing: Features and Issues.', in *IoTBD*, pp. 307–314.

Nuñez-Varela, A.S. *et al.* (2017) 'Source code metrics: A systematic mapping study', *Journal of Systems and Software*, 128, pp. 164–197. doi:10.1016/j.jss.2017.03.044.

Poola, D. *et al.* (2017) 'A taxonomy and survey of fault-tolerant workflow management systems in cloud and distributed computing environments', in *Software architecture for big data and the cloud*. Elsevier, pp. 285–320.

Raguseo, E. (2018) 'Big data technologies: An empirical investigation on their adoption, benefits and risks for companies', *International Journal of Information Management*, 38(1), pp. 187–195. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.008.

Saadoon, M. *et al.* (2021) 'Fault tolerance in big data storage and processing systems: A review on challenges and solutions', *Ain Shams Engineering Journal* [Preprint]. doi:10.1016/j.asej.2021.06.024.

Salma, C.A., Tekinerdogan, B. and Athanasiadis, I.N. (2016) 'Feature Driven Survey of Big Data Systems', in *Proceedings of the International Conference on Internet of Things and Big Data*. SCITEPRESS - Science and and Technology Publications, pp. 348–355. doi:10.5220/0005877503480355.

Shahid, M.A. *et al.* (2021) 'Towards Resilient Method: An exhaustive survey of fault tolerance methods in the cloud computing environment', *Computer Science Review*, 40, p. 100398. doi:10.1016/j.cosrev.2021.100398.

Singhani, H. and Suri, P.R. (2015) 'Testability assessment model for object oriented software based on internal and external quality factors', *Global Journal of Computer Science and Technology* [Preprint].

Wu, X. *et al.* (2017) 'The Fault Tolerance of Big Data Systems', in, pp. 65–74. doi:10.1007/978-981-10-3996-6_5.

Yu, J. and Buyya, R. (2005) 'A Taxonomy of Workflow Management Systems for Grid Computing', *Journal of Grid Computing*, 3(3–4), pp. 171–200. doi:10.1007/s10723-005-9010-8.

Zanoon, N., Al-Haj, A. and Khwaldeh, S.M. (2017) 'Cloud computing and big data is there a relation between the two: a study', *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(17), pp. 6970–6982.

Zhang, P. *et al.* (2017) 'A survey on quality assurance techniques for big data applications', in *2017 IEEE Third International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService)*, pp. 313–319.

ISSN en trámite

Breve revisión de la literatura sobre Modelos Predictivos para la Detección de Enfermedades Cardiovasculares

Eduardo Sánchez-Jiménez, Yasmín Hernández, Javier Ortiz

TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. 62490 México (Tel: 993-459-8058; e-mail: {m22ce005, yasmin.hp, javier.oh}@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: Durante los últimos años, se han desarrollado una variedad de modelos de predicción que combinan múltiples predictores para estimar el riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares. En este artículo se presenta una breve revisión de algunas técnicas y modelos predictivos basados en algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo. Los algoritmos más utilizados son: *Random Forest, Naive Bayes, Decision Trees, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbour*. Los resultados del análisis señalan que el mejor modelo fue desarrollado por Valarmathi *et al*. a partir del algoritmo Random Forest y aplicando ajuste de hiperparámetros, obtuvieron el 97.56% de exactitud en la predicción usando los conjuntos de datos Cleveland.

Keywords: aprendizaje automático, enfermedades cardiovasculares, minería de datos, modelo predictivo.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares (ECV) son una de las principales causas de muerte en muchos países, principalmente en los países en donde los servicios básicos de salud no son suficientes para el control de este tipo enfermedades. Hoy en día, la predicción de ECV tiene un gran reto con el tratamiento y procesamiento de datos médicos, las instituciones de salud recopilan una gran cantidad de datos clínicos, por lo que la capacidad de extraer conocimiento de un gran volumen de datos puede ser útil para tomar decisiones efectivas. La minería de datos en el sector salud es un campo emergente y tiene un gran potencial para apoyar en el pronóstico y la comprensión profunda de los registros médicos (Shouman *et al.,* 2012). La comunidad científica ha realizado diversos estudios sobre predicción de ECV mediante distintas técnicas de minería de datos y aprendizaje automático. Los modelos que se han propuestos han tenido éxito ya que presentan buenos resultados en la detección de ECV.

En este artículo se presenta un análisis de la literatura en modelos de predicción de ECV y sus técnicas de preprocesamiento de datos. Con ello, podremos identificar el modelo que proporciona un máximo resultado de predicción. En la sección 2 se presenta una descripción general de la minería de datos y se presentan los conjuntos de datos públicos más utilizados en la literatura. En la sección 3 se analizan los distintos modelos de predicción de ECV. Finalmente, la sección 4 presenta las conclusiones del análisis.

2. ANTECEDENTES

El sector salud genera datos del diagnóstico y tratamientos de los pacientes que regularmente se almacenan en sistemas de gestión de salud. Las técnicas de minería de datos ayudan a extraer conocimiento valioso sobre las relaciones y tendencias ocultas en los datos médicos. Con ello se busca apresurar la toma de decisiones (Shelly *et al.,* 2011). Las técnicas de minería de datos se dividen en cuatro tipos: clasificación, agrupamiento, regresión y minería de reglas de asociación. Los métodos de clasificación son los algoritmos más utilizados en el sector salud, pues ayudan a predecir el estado del paciente mediante la clasificación de los registros de los pacientes y la búsqueda de la clase que coincide con el nuevo registro (Eesa *et al.,* 2015). Por otro lado, las técnicas de agrupamiento son una herramienta fundamental del proceso de análisis avanzado de datos porque permiten segmentar grandes volúmenes de datos en grupos más pequeños, interpretables y diferenciables entre sí, dejando ver relaciones que muchas veces son difíciles de ver a simple vista. Las técnicas de minería de reglas de asociación, por ejemplo, se han utilizado para construir un modelo que determina las relaciones entre los valores de los atributos de los pacientes para descubrir relaciones interesantes entre las variables del conjunto de datos (Zriqat *et al.,* 2017).

Los conjuntos de datos relacionados con pacientes que presentan ECV contienen muchos atributos (biológicos, por ejemplo) que mayormente no generan un impacto directo en el diagnóstico de la enfermedad, eliminar los atributos redundantes del conjunto de datos, además de reducir la complejidad computacional, también se puede mejorar el

ISSN en trámite

desempeño de los modelos predictivos (Nanehkaran *et al,* 2022). La complejidad e incluso el sobreajuste pueden dar lugar a malos resultados. La reducción de la dimensión del conjunto de datos es, por lo tanto, un paso necesario en la creación de cualquier modelo de predicción (Udhan *et al,* 2021), y se consigue generalmente mediante dos métodos: la selección de atributos y la extracción de atributos. El primer método se utiliza para reducir el impacto de la dimensionalidad en el conjunto de datos a través de la búsqueda del subconjunto de atributos que definen eficazmente los datos (Padmaja *et al.,* 2016); se seleccionan los atributos importantes y relevantes para la tarea de minería a partir de los datos de entrada y elimina los atributos redundantes e irrelevantes (Eesa *et al.,* 2015). La selección de atributos es útil para descubrir un buen subconjunto de atributos apropiado para el problema establecido. Por otro lado, con el segundo método, se extraen los nuevos atributos del conjunto de datos inicial, es muy provechoso cuando se quiere disminuir el número de recursos necesarios para el procesamiento sin perder el conjunto de datos con los atributos más relevantes. La extracción de atributos produce una notable transformación de los primeros atributos para crear atributos más significativos (Zebari et al, 2020).

El repositorio de UCI (*University of California, Irvine*) alberga una colección de conjuntos de datos de distintas enfermedades utilizados por la comunidad para el análisis de algoritmos de minería de datos y aprendizaje automático. Los modelos de predicción analizados en este artículo utilizan los conjuntos de datos: Cleveland, *Hungarian, Switzerland y Long Beach V.,* que contienen 303, 294, 123, 200 registros, respectivamente.

Z-Alizadeh Sani es otro conjunto de datos con 303 muestras, tres de sus atributos son muy particulares ya que son referentes de tres arterias coronarias (LAD: arteria descendente anterior izquierda; LCX: arteria circunfleja izquierda y RCA: arteria coronaria derecha), este conjunto de datos no solo se puede utilizar para la detección de ECV, sino también para el diagnóstico de estenosis de cada una de esas arterias. En el modelo propuesto por Ayatollahi *et al.* (2019) el conjunto de datos estuvo conformado por 1324 historias clínicas de pacientes con enfermedad arterial coronaria que estuvieron hospitalizados en tres centros afiliados a la Universidad de Ciencias Médicas AJA entre marzo de 2016 y marzo de 2017. Cada uno de estos conjuntos de datos fue preprocesado con distintas técnicas de selección y extracción de atributos y estandarización de datos. Por ejemplo, la imputación media (*Mean Imputation*) resuelve los problemas de valores faltantes. La técnica *Isolation Forest* (IF) ayuda en la detección de valores atípicos. Los algoritmos LASSO (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*), *Filter Based Feature Selection* (FBFS) y *Sequential Forward Selection* (SFS) seleccionan los atributos más significativos de un conjunto de datos. Para el escalamiento de datos el método *Standard Scalar* (SS) funciona perfectamente. La técnica *One-Hot* se aplica al tratamiento de los atributos categóricos que puede contener un conjunto de datos; el análisis factorial (AN) es una técnica estadística de reducción de datos usada para explicar las correlaciones entre las variables. Por otro lado, los algoritmos de minería de datos y aprendizaje automático contemplados en los modelos analizados en este artículo son: *Random Forest* (RF), *Naive Bayes* (NV), *Logistic Regression* (LR), *Generalized Linear Model* (GLM), *Decision Trees* (DT), *Gradient Boosted Trees* (GBT), *Support Vector Machine* (SVM), *Artificial Neural Networks* (ANN), *K-Nearest Neighbour* (KNN), *Language Model* (LM), *Extremely Randomized Trees* (ERT). Las técnicas de optimización de hiperparámetros de los algoritmos utilizados en algunos modelos son: *Linear Discriminant Analysis* (LDA), *Grid Search* (GS), *Tree-based Pipeline Optimization Tool* (TPOT) y *Randomized Search* (RS). Por último, las métricas para evaluar el rendimiento de los modelos: Error Cuadrático Medio – ECM, Exactitud – A_C; Precisión – P_R; Puntaje F1 – P_F; Sensibilidad – S_E; Especificidad – S_P; Classification Error Rate – CER se utilizan en la mayoría de los modelos analizados en este trabajo.

3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE ECV

En esta sección se presentan modelos predictivos basados en aprendizaje automático, aprendizaje profundo y agrupamiento; su descripción general y el preprocesamiento del conjunto de datos.

3.1 Modelos basados en Aprendizaje Profundo

Uyar *et al.* (2017) definieron un modelo genético basado en ANN difusas recurrentes para el diagnóstico de las enfermedades del corazón. El modelo que proponen tiene trece entradas; siete neuronas ocultas y una neurona de salida. Los pesos y sesgos del algoritmo genético se codificaron como genes de 64 bits de longitud. Utilizaron el conjunto de datos Cleveland; las métricas ECM, S_E, S_P, P_R, P_F y A_C evalúan el desempeño del modelo propuesto. Los resultados del subconjunto de entrenamiento mostraron que el modelo genético obtuvo una tasa del 96.43% A_C; para el subconjunto de pruebas obtuvieron 97.78% A_C; y en los resultados generales se obtuvo el 96.63% A_C.

Mienye *et al.* (2021) trabajaron con un enfoque de optimización de parámetros de una red autocodificadora dispersa (SSAE, del inglés *Enhanced Stacked Sparse Autoencoder Network),* con los conjuntos de datos Cleveland y Framingham, para resolver los problemas de valores faltantes utilizaron MI, esta técnica reemplaza los valores faltantes de un determinado atributo por la media de los casos no faltantes de ese atributo. Luego, crearon una red autocodificadora dispersa para lograr un aprendizaje eficiente a partir de los atributos seleccionados. La red consiste en múltiples redes neuronales artificiales no supervisadas dispersas apiladas y un clasificador *softmax*. Esta

ISSN en trámite

investigación presenta un enfoque eficiente de predicción ECV a partir de la técnica de optimización de enjambre de partículas PSO (*Particle Swarm Optimization)* para optimizar los parámetros del autocodificador disperso apilado. La optimización de los parámetros del autocodificador disperso asegura que el algoritmo logre un aprendizaje eficiente de los atributos. Los resultados experimentales mostraron que el modelo SSAE predice ECV con un 97.3% de A_C con los datos de Framingham y 96.1% con Cleveland.

Ayatollahi *et al.* (2019) implementaron dos modelos de predicción de Enfermedad Arterial Coronaria usando los algoritmos ANN y SVM con el objetivo de comparar el valor predictivo positivo (o también llamado P_R) de pacientes hospitalizados; dicho valor es la proporción de pacientes verdaderamente diagnosticados como positivos a todos los que tuvieron resultados positivos en la prueba (incluidos los sujetos sanos que fueron diagnosticados incorrectamente como pacientes). Para el desarrollo de los modelos implementaron técnicas de preprocesamiento de datos, integración, limpieza, normalización y reducción del conjunto de datos, utilizaron las herramientas SPSS, Microsoft Excel y el software R para el cálculo estadístico. Extrajeron 25 atributos predictores del conjunto de datos y se usaron como atributos de entrada para calcular el peso de cada una ejecutando algoritmos para ajustar el modelo de ANN multicapa. Los resultados mostraron que la bondad de ajuste fue apropiada en el modelo de ANN con el valor predictivo positivo, el menor ECM y error relativo en el conjunto de datos de prueba. Además de la métrica $P_{F,}$ el coeficiente *Kappa de Cohen* determinó el valor predictivo positivo del modelo SVM, mostrando así una potencia y una sensibilidad de moderadas a altas para predecir pacientes con enfermedad arterial coronaria. Además, con la métrica de curva ROC se observó que el modelo SVM obtuvo el mejor valor predictivo positivo (92.32%), menor error porcentual absoluto medio, mayor valor de la prueba de bondad de ajuste y un valor superior al modelo ANN en término de S_P.

Bharti *et al.* (2021) utilizaron los algoritmos de aprendizaje automático: LR, KNN, DT, RF, SVM y XGBoost. Además, propusieron un modelo de aprendizaje profundo a partir de un enfoque del modelo secuencial, dicho modelo utiliza 128 neuronas y la función de activación, con pérdida como entropía cruzada binaria y el optimizador Adam (*Adaptative Moment Optimization*); este algoritmo optimiza la tasa de aprendizaje adaptativo y es diseñado específicamente para entrenar ANN profundas. En el análisis de los conjuntos de datos Cleveland, Hungría, Suiza y Long Beach V detectaron valores atípicos y que los datos no siguen una distribución normal. Por ello utilizaron tres enfoques, en el primero excluyeron el tratamiento de los valores atípicos y el proceso de selección de atributos, aplicaron directamente los algoritmos; con el segundo enfoque realizaron la selección de atributos, pero sin detectar de valores atípicos; en tercer enfoque, el conjunto de datos fue normalizado con la técnica IF para la detección de valores atípicos y para seleccionar los atributos aplicaron el algoritmo LASSO. Los resultados del primer enfoque mostraron que SVM obtiene un valor mayor de A_C luego del ajuste de hiperparámetros con el método GS, el modelo de aprendizaje profundo logró 76.7% A_C; con el segundo enfoque, luego de aplicar el método de escalamiento de datos SS al modelo RF logró la mayor A_C (88.4%), así mismo, el modelo de aprendizaje profundo obtuvo 86.8% A_C. Finalmente, en el tercer enfoque, la mejor A_C la alcanzó el modelo KNN (83.29% A_C), para el aprendizaje profundo 81.9% A_C.

3.2 Modelos de Aprendizaje Automático con ajuste de Hiperparámetros

Gupta *et al.* (2020) definieron un marco de trabajo de inteligencia artificial basado en modelos predictivos para el diagnóstico de ECV. El marco propuesto analiza los modelos LR, KNN, SVM, DT, RF entrenados con el conjunto de datos Cleveland. Utilizaron la técnica estadística de reducción de datos AF en la fase de preprocesamiento del conjunto de datos, debido a que el conjunto de datos comprende atributos tanto numéricas como categóricas. El marco de trabajo provee la mejor combinación del conjunto de atributos y el algoritmo con ajuste de hiperparámetros. Las métricas para evaluar el rendimiento de los modelos son: A_C, S_E, S_P, $P_{R,}$ P_F, coeficiente de correlación de Matthew y curvas ROC. Al realizar la comparación con otros modelos existentes, los resultados mostraron valores de A_C, S_E y S_P de 93.44%, 89.28% y 96.96%, respectivamente, siendo superior a los demás métodos.

Budholiya *et al.* (2021) establecieron un sistema optimizado basado en el algoritmo XGBoost para la predicción de enfermedades cardíacas. Utilizaron la técnica One-Hot para codificar los atributos categóricos del conjunto de datos Cleveland. Para obtener la mejor solución de forma sistemática y eficaz aplicaron técnicas de ajuste de los hiperparámetros al algoritmo XGBoost. El algoritmo de optimización bayesiana aplica las diferentes combinaciones de hiperparámetros e intenta maximizar la puntuación media de AUC en cada iteración. Una vez completado el número de iteraciones, selecciona el modelo con la puntuación media de AUC más alta para la predicción en los datos de prueba retenidos. Los resultados del modelo propuesto se comparan con los clasificadores RF y ERT para verificar la eficacia del modelo propuesto. Estos dos clasificadores también fueron entrenados con el mismo conjunto de datos y construidos con las mismas técnicas de ajuste de hiperparámetros. El análisis comparativo se lleva a cabo en función de la exactitud de la clasificación de ECV. Concluyeron que el modelo XGBoost supera a los modelos RF y ERT un 3.28 % en términos de A_C.

Valarmathi *et al.* (2021) proponen dos modelos de predicción basados en los algoritmos RF y XGBoost y los conjuntos de datos Cleveland y Z-Alizadeh Sani. Para crear los modelos aplican la técnica de construcción de clasificadores *Synthetic Minority Over-sampling Technique* (SMOTE) a partir del conjunto de datos Z-Alizadeh Sani. Los atributos

ISSN en trámite

insignificantes del conjunto de datos Cleveland se eliminaron luego de aplicar la técnica SFS. El rendimiento de los modelos fue evaluado con una validación cruzada de diez veces y las métricas A_C, S_E, S_P, P_R, P_F y curvas ROC. El objetivo del estudio se basa es el análisis comparativo del rendimiento predictivo de los dos algoritmos, aplicando las técnicas de ajuste de hiperparámetros GS, RS y TPOT para optimizar el rendimiento de los clasificadores RF y XGBoost. Cuando se optimizó el algoritmo RF con la técnica TPOT se obtuvo el mejor valor de A_C (97.52%) en comparación con XGBoost, en el conjunto de datos Cleveland. Para el caso del conjunto de datos Z-Alizadeh Sani, RF con la técnica de ajuste RS muestra los mayores valores de A_C 80.2%, 73.6% y 76.9% para el diagnóstico de estenosis de las arterias LAD, LCX y RCA.

3.3 Modelos basados en agrupamiento de datos

Venkatesh et *al. (2019)* crearon un modelo de Big Data para la predicción de ECV mediante el algoritmo NB. El modelo se entrena con los conjuntos de datos de la UCI, utilizaron el framework *Apache Spark* para realizar análisis predictivos de big data, reduciendo la complejidad del cálculo debido al paralelismo con el que trabaja. Aplicaron procesos de normalización para reducir el error medio absoluto, con ello obtuvieron un alto porcentaje de A_C (97.12%) y predicción de los resultados. El desarrollo del modelo incluye dos fases: la fase de agrupación implica el preprocesamiento de los datos y la agrupación de los datos en función de las enfermedades. La fase de predicción encuentra las etiquetas de clase con la técnica NB. Establecieron una medición de uso de la CPU con agrupamientos multimodo variando los nodos en 5, 10, 15 y 20, respectivamente. El modelo usó una gran parte de la CPU para procesar el conjunto de datos debido a que los datos se distribuyeron en un clúster de varios nodos y su ejecución fue en paralelo. Los resultados en la predicción aseguraron que el modelo propuesto mejoró significativamente en términos de A_C, utilización de la CPU y tiempo de procesamiento, manteniendo un valor por encima del 97% de A_C mientras se incrementa el tamaño del conjunto de datos.

3.4 Modelo híbrido de Aprendizaje Automático

Mohan *et al.* (2019) definen la técnica *Hybrid Random Forest with Linear Model* (HRFLM). El enfoque híbrido combina los atributos de algoritmo RF y el método lineal. HRFLM tiene como objetivo encontrar atributos significativos mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje automático que resultan en la mejora de A_C en la predicción de ECV. El preprocesamiento del conjunto datos Cleveland se lleva a cabo convirtiendo los registros médicos en valores de diagnóstico. De entre los 13 atributos seleccionados, se utilizan dos atributos relativos a la edad y el sexo para identificar la información personal del paciente. La agrupación del conjunto de datos se realiza sobre la base de las variables y los criterios de las características del algoritmo DT. A continuación, se aplican los clasificadores a cada conjunto de datos agrupado para estimar su rendimiento. El modelo con mejor rendimiento se identifica a partir de los resultados en función de su baja tasa de error. Los resultados de los experimentos muestran (88.7% A_C) que HRFLM tiene una mayor capacidad para predecir las ECV en comparación con los métodos existentes.

4. DISCUSIÓN

El análisis estadístico es importante cuando se analiza un conjunto de datos, es recomendable que los datos tiendan a una distribución gaussiana, así mismo, es de suma importancia la detección de valores atípicos (Bharti *et al,* 2021*).* En el enfoque híbrido propuesto por Mohan *et al*. (2019) el modelo demostró ser exacto en la predicción, aunque se pueden desarrollar nuevos métodos de selección de atributos para obtener una percepción más amplia de los atributos significativos para aumentar el rendimiento de predicción. La eliminación de los atributos irrelevantes tuvo un gran impacto en el rendimiento de modelo propuesto por Valarmathi *et al.* (2021), así mismo, el ajuste de hiperparámetros ayudó a explorar el espacio de búsqueda de forma eficiente. Se redujeron los tiempos de cálculo en el modelo definido por Venkatesh *et al.* (2019) lo que resulta muy útil a la hora de desplegar el modelo. En el trabajo de Ayatollahi *et al.* (2019) se normalizó el conjunto de datos para evitar que el modelo de entrenamiento se sobreajustara y el valor de A_C alcanzado no fuera bueno al probar el modelo con los nuevos datos, que pueden variar considerablemente con respecto al conjunto de datos con el que se entrenó el modelo. En la investigación de Mienye *et al.* (2021) el método propuesto obtuvo buenos resultados con pocas muestras, lo cual es vital porque la recolección de datos es una tarea compleja y costosa. En la Figura 1 se muestran los resultados de las métricas de rendimiento consideradas por cada modelo propuesto. El modelo de Valarmathi *et al.,* (2021) obtuvo el mejor valor de A_C (97.52%) aplicando RF con el método de optimización de hiperparámetros TPOT.

Los investigadores han creado varios modelos expertos a lo largo de los años para predecir de manera temprana las ECV y con ello ayudar al personal médico a mejorar el proceso de diagnóstico. Hemos analizado nueve modelos basados en clasificadores de aprendizaje automático, aprendizaje profundo, agrupamiento, modelos híbridos. En la Tabla 1 presentamos una comparación de los modelos para el diagnóstico de ECV.

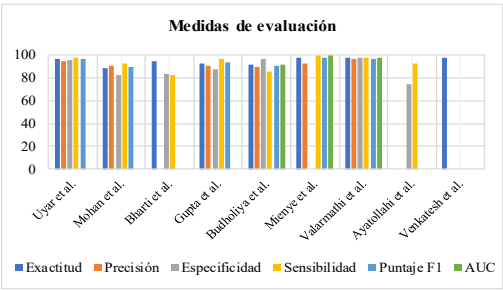


Figura 1. Resultados de los modelos analizados

ISSN en trámite

Tabla 1. Comparación de los modelos para el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares

Autor	Método propuesto	Conjunto de datos	Algoritmos	Mejores Resultados
Uyar et al., (2017)	Redes neuronales difusas recurrentes basadas en Algoritmos genéticos	Cleveland	ANN y GA	A_c: **96.63**, RMSE: 0.03337, PME: 3.37, S_e: 97.74, S_p: 95.73, P_r: 94.89, F_p: 0.9629
Mohan et al., (2019)	Algoritmo Random Forest híbrido con Modelo Lineal		RF, NB, LR, GLM, DT, GBT, SVM, LM, ANN y KNN	RF A_c: **88.4**, CER: 11.6, P_r: 90.1, F_p: 90, S_e: 92.8, S_p: 82.6.
Venkatesh et al., (2019)	Análisis predictivo de Big Data para la predicción de ECV		NB y Algoritmos Clustering	A_c: **97.12**%. Mayor uso de la CPU por la distribución de datos en clústeres y ejecución en paralelo
Ayatollahi et al., (2019)	Algoritmos de minería de datos para la predicción de enfermedades coronarias.	Universidad de Ciencias Médicas AJA	ANN y SVM	ANN / SVM ANN **obtuvo mejor** A_C que SVM (No especifican el porcentaje A_C) MAPE: 125.17/112.03, Hosmer-Lemeshow: 12.4/16.71, S_e: 88.01/92.32, S_p: 73.64/74.42
Gupta et al., (2020)	Modelo basado en aprendizaje automático supervisado para la predicción de enfermedades cardíacas	UCI	RF, NB, LR, DT, SVM y KNN	LR: A_c: **92.3**, S_e: 96.8, S_p: 87.5, P_r: 90.74, F_p: 93.34
Budholiya et al., (2020)	Optimización del XGBoost en dataset con atributos categóricas codificadas en One-Hot	Cleveland	XGBoost, RF y Extra-Trees	XGBoost: A_c: **91.80**, S_e: 85.71, S_p: 96.96, F_p: 90.56, AUC: 91.34
Mienye et al., (2021)	Optimización de parámetros de una red de autocodificadores mediante la técnica *PSO*	Cleveland Framingham	ANN, KNN, LR, LDA, SVM, DT, SoftmaxC, XGBoost, RF, AdaBoost	ANN - Framingham / Cleveland A_c: **97.3/96.1**, P_r: 93/94.8, S_e: 100/98.8, F_p: 97.3/95.8, AUC: 100/98
Valarmathi et al., (2021)	Técnicas de optimización de Hiperparametros para Random Forest y XG Boost	Cleveland Z-Alizadeh Sani	RF y XGBoost	RF-TPOT Classifier / RF-RS Cleveland / Z-Alizadeh Sani A_c: **97.52** / (LAD **80.2** - LCX **73.6** - RCA **76.9**), P_r: 97, S_e: 97.29, S_p: 97.70
Bharti et al., (2021)	Combinación de Machine Learning-Deep Learning y optimización de dataset	Cleveland, Hungary, Switzerland, Long Beach V	LR, KNN, SVM, RF, DT Y ANN (Deep Learning)	KNN / ANN A_c: **83.29/94.2**, S_p: 77.7/83.1, S_e: 85/82.1

ISSN en trámite

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo se centra en el análisis de algunos modelos de predicción de ECV de la literatura, propuestos por distintos investigadores expertos en el área de ciencia de datos, quienes aplican una gran variedad de técnicas de aprendizaje automático que al combinarlas generan modelos predictivos lo suficientemente exactos. Concluimos que el modelo basado en *Random Forest* propuesto por Valarmathi *et al.,* (2021) resultó ser el modelo con mayor rendimiento de predicción en términos de A_C, P_R y S_P de los estudios contemplados en esta revisión. Esto se debe a la técnica de optimización de los hiperparámetros TPOT. Cabe aclarar que en el modelo propuesto por Ayatollahi *et al.,* (2019) el valor de A_C es calculado, pero no se especifica, por lo que no es contemplado al seleccionar el modelo con mejor rendimiento en términos de A_C. Por otro lado, el modelo SSAE con optimización PSO de Mienye et *al.,* (2021) presentó mayores resultados de predicción en términos de S_E, lo que implica que todas las muestras positivas se predijeron correctamente en el conjunto de pruebas.

Las técnicas de ajuste de hiperparámetros en algoritmos de aprendizaje automático que generan modelos de predicción de ECV necesita ser más estudiadas; se necesitan pruebas de estas técnicas con distintos algoritmos de minería de datos y con otros conjuntos de datos de ECV con el fin de evaluar su capacidad de predicción con los modelos existentes.

REFERENCIAS

Ahmad, P., Qamar, S., & Rizvi, S. Q. A. (2015). Techniques of Data Mining In Healthcare: A Review. International *Journal of Computer Applications*, 120(15), 38–50. https://doi.org/10.5120/21307-4126

Ayatollahi, H., Gholamhosseini, L., & Salehi, M. (2019). Predicting coronary artery disease: a comparison between two data mining algorithms. *BMC Public Health*, 19(1), 448. https://doi.org/10.1186/s12889-019-6721-5

Bharti, R., Khamparia, A., Shabaz, M., Dhiman, G., Pande, S., & Singh, P. (2021). Prediction of Heart Disease Using a Combination of Machine Learning and Deep Learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*. https://doi.org/10.1155/2021/8387680

Budholiya, K., Shrivastava, S. K., & Sharma, V. (2020). An optimized XGBoost based diagnostic system for effective prediction of heart disease. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.10.013

Eesa, A. S., Orman, Z., & Brifcani, A. M. A. (2015). A novel feature-selection approach based on the cuttlefish optimization algorithm for intrusion detection systems. *Expert Systems with Applications*, 42(5), 2670–2679. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.009

Gupta, A., Kumar, R., Arora, H. S., & Raman, B. (2020). MIFH: A Machine Intelligence Framework for Heart Disease Diagnosis. *IEEE Access*, 8, 14659–14674. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962755

Mienye, I. D., Sun, Y., Corchado, J. M., & Mehmood, R. (2021). Improved Heart Disease Prediction Using Particle Swarm Optimization Based Stacked Sparse Autoencoder. *Journal Electronics.* https://doi.org/10.3390/electronics10192347

Mohan, S., Thirumalai, C., & Srivastava, G. (2019). Effective Heart Disease Prediction Using Hybrid Machine Learning Techniques. *IEEE Access*, 7, 81542–81554. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923707

Nanehkaran, Y. A., Licai, Z., Chen, J., Jamel, A. A. M., Shengnan, Z., Navaei, Y. D., & Aghbolagh, M. A. (2022). Anomaly Detection in Heart Disease Using a Density-Based Unsupervised Approach. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 14. https://doi.org/10.1155/2022/6913043

Padmaja, D. L., & Vishnuvardhan, B. (2016). Comparative Study of Feature Subset Selection Methods for Dimensionality Reduction on Scientific Data. *2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC)*, 31–34. https://doi.org/10.1109/IACC.2016.16

Shouman, M., Turner, T., & Stocker, R. (2012). Using data mining techniques in heart disease diagnosis and treatment. *2012 Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers*, 173–177. https://doi.org/10.1109/JEC-ECC.2012.6186978

Udhan, S., & Patil, B. (2021). A systematic review of Machine learning techniques for Heart disease prediction. *International Journal of Next-Generation Computing*, 12(2), 229–239.

Uyar, K., & Ilhan, A. (2017). Diagnosis of heart disease using genetic algorithm based trained recurrent fuzzy neural networks. *Procedia Computer Science*, 120, 588–593. https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2017.11.283

Valarmathi, R., & Sheela, T. (2021). Heart disease prediction using hyper parameter optimization (HPO) tuning. *Biomedical Signal Processing and Control*, 70, 103033. https://doi.org/10.1016/J.BSPC.2021.103033

Venkatesh, R., Balasubramanian, C., & Kaliappan, M. (2019). Development of Big Data Predictive Analytics Model for Disease Prediction using Machine learning Technique. *Journal of Medical Systems*, 43(8), 272. https://doi.org/10.1007/s10916-019-1398-y

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

Zriqat, I. A., Altamimi, A. M., & Azzeh, M. (2017). A Comparative Study for Predicting Heart Diseases Using Data Mining Classification Methods. *International Journal of Computer Science and Information Security*. 14, 868-879.

ISSN en trámite

Aplicación móvil para una transición hacia la agricultura inteligente: caso de estudio limón persa

S. I. Castillo-Martínez*, R. García-Castro**, R. U. Martínez-Andrade ***, M. Contreras-de la Cruz ****, R. Ruiz-Castro*****, A. M. Morales- Rayón******

** Tecnológico Nacional de México, TecNM*
Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, ITSZ
Km. 4, Carretera a La Compañía S/N, Col. Tepetitlanapa, C.P. 95005
Zongolica, Veracruz, México.
**susana_castillo@zongolica.tecnm.mx*
***ricardo.garcia.pd18@zongolica.tecnm.mx*
****196w0491@zongolica.tecnm.mx*
*****martin_isc@zongolica.tecnm.mx*
******roberto_isc@zongolica.tecnm.mx*
*******art_martin_isc@zongolica.tecnm.mx*

Resumen: El presente trabajo, describe el desarrollo de una aplicación móvil Android destinada a productores de limón persa en distintos municipios en el estado de Veracruz. Los productores se enfrentan a problemas referentes a la producción, tratamiento de plagas y venta de limón persa.

Para la realización de la presente investigación, se utilizó el entorno de Desarrollo Integrado Android Studio bajo el lenguaje de programación Kotlin y Java, haciendo uso de la herramienta de Google Firebase, específicamente con el módulo Realtime Database, la API de OpenWeatherMap e integra una ventana con el servicio de Sistema Nacional de Integración e Información de Mercados (SNIIM).

Persa App ofrece una solución a las problemáticas anterioemente mencionadas a partir de las distintas funcionalidades que posee como la consulta de clima, precio, plagas y fichas técnicas de los productos químicos suceptibles a aplicarse en el campo.

Esta herramienta favorece principalmente a los productores en la toma de decisiones, permitiendo la mejora constante y el crecimiento económico de su actividad productiva.

Palabras Clave: Android, Firebase, Aplicación Móvil, Kotlin, Persa, Agricultura.

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto, describe el desarrollo de una aplicación móvil Android denominada "Persa", para la consulta de información, que influye en la toma de decisiones respecto a la producción de limón persa. La aplicación móvil fue desarrollada mediante Android Studio, permite consultar las condiciones del clima actual en la zona donde se encuentra, cotizar el precio del limón en los principales mercados de exportación local, y asesoramiento técnico sobre la aplicación de agroquímicos y la ficha técnica de estos. El proyecto plantea como objetivo aportar una herramienta tecnológica al sector agrícola para mejorar los ingresos monetarios de los campesinos, mantener y/o mejorar la calidad del producto, y prevenir el cultivo ante pérdidas por plagas, enfermedades e incluso condiciones atmosféricas poco favorables para el proceso productivo.

1.1 *Antecedentes*

Villalobos et al. (2018) desarrollaron un sistema web y móvil para la gestión de cultivos con sistema de riego. Identificaron que los productores presentan diversas situaciones respecto a los cultivos, como las condiciones climáticas, costos y distancias, por eso optaron por la gestión remota con los cultivos, permitiendo programar actividades y optimizando los recursos correspondientes.

Sulca (2016) desarrolló la aplicación móvil Agro-Cisc para el sector agrícola en Guayaquil, Ecuador. Dicho software permite llevar un registro virtual de los incidentes en el cultivo, crear recordatorios para la compra de insumos o aplicación de fumigación, monitoreo de clima actual entre otras funciones, que permiten al agricultor llevar un mejor control de sus labores.

ISSN en trámite

En mismo año, Haro hizo público el desarrollo e implementación de una aplicación móvil para regularizar el uso de los productos químicos haciendo mención que el uso excesivo de estos presentan un riesgo para la salud, dañan el suelo, destruyen los recursos naturales y representan un problema para la agricultura sustentable.

1.2 Problemática

Veracruz se encuentra entre los principales estados productores de limón persa (INTAGRI, 2018). Estos productores presentan perdidas en la producción de limón debido a factores atmosféricos, mal manejo en control de plagas, además de sufrir pérdidas económicas en la venta de producto (Corona, 2015).

Los campesinos productores no poseen los conocimientos necesarios para gestionar de manera óptima los cultivos, los conocimientos que adquirieron son heredados por generación o incluso conocimiento intuitivo sin saber realmente el porqué de las actividades que realizan (Haro, 2016). De igual forma no cuentan con alguna herramienta que los oriente en la toma de decisiones.

A pesar del extenso catálogo de aplicaciones móviles, son escasas las que se orientan a la agricultura, siendo esta de gran importancia para la economía y por producir alimentos a los hogares.

El proyecto desarrolla una aplicación para dispositivos móviles basados en sistema operativo Android, que permita la consulta del estado del tiempo como parámetro para tomar una decisión sobre la siembra y cosecha del limón persa, como también la ficha técnica de productos químicos utilizados en el proceso de producción, y cotizar el precio del limón en mercados locales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología para el desarrollo del proyecto utilizado es el modelo por prototipos (Figura 1), permite desarrollar un software a bajo costo y en poco tiempo, es accesible a modificaciones sobre la marcha gracias a constantes retroalimentaciones (Pressman, 2010).

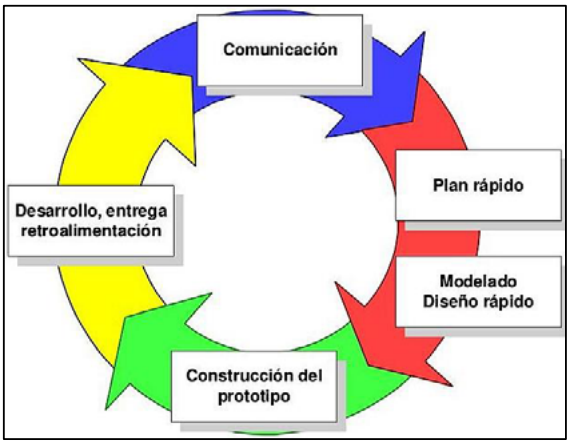


Fig. 1. Metodología por prototipos

Las etapas fueron realizadas como se enlista a continuación.

2.1 Comunicación

Se definen los objetivos generales del software, se identifican los requerimientos funcionales, se identifican usuarios y modelos del sistema, saber que se va a realizar, el propósito del prototipo y todos los elementos que lo requieren.

2.2 Plan y modelado rápido

Se definen las actividades y las fechas en que se realizaran junto con el desarrollo de las interfaces, además se realizan los primeros bosquejos del prototipo, se atiende el diseño, las interfaces, las entradas y salidas de datos, así como también se establece la arquitectura del software a seguir.

2.3 Construcción del prototipo

Durante esta etapa, se obtiene el software en versión de prototipo, utilizando android studio como parte del desarrollo del mismo, además de realizar las instancias hacia los servicios que ocupara la aplicación.

2.4 Pruebas

Se realizaron pruebas internas o de componentes, validando los resultados de cada sección, monitoreando y depurando el programa para hacer correcciones y/ mejores en general, pruebas de integración donde se verificaron los diferentes componentes del software que estén bien ensamblados, las pruebas de aceptación, las cuales fueron realizadas por algunos productores con el fin de que la aplicación esté lista para su producción o salida y ser transferida a ellos para su uso.

2.5 Desarrollo, retroalimentación y entrega

ISSN en trámite

Una vez presentado el prototipo, es sometido a retroalimentaciones para mejorar los requerimientos utilizando técnicas para su evaluación. Esta interacción es realizada cada que el prototipo es afinado hasta llegar a la versión final del prototipo, esto se realiza probando en diversos teléfonos la aplicación para realizar adecuaciones y detallando funcionalidades.

3. RESULTADOS

La aplicación móvil "Persa" permite a los agricultores de limón persa tomar decisiones preventivas y efectivas para mantener y asegurar la calidad del producto. Las funciones de persa se describen a continuación:

Pantalla principal con una leyenda acompañada del nombre Persa y logotipo, además cuenta con un menú desplegable para navegar entre las funciones (Figura 2).



Fig. 2. Pantalla principal y menú desplegable

En la sección del clima podemos consultar las condiciones atmosféricas en tiempo real junto con una lista desplegable para consultar el clima en las otras ciudades productoras de limón. La consulta del clima permite al productor conocer si las condiciones son óptimas para realizar las labores agrícolas de fertilización y corte, debido a que la producción depende de estas prácticas, y la realización de éstas a su vez dependen de la temperatura del aire y precipitación que la aplicación el software proporciona al productor para que éste tome la decisión de si es el momento idóneo para realizarlas. (Figura 3).



Fig. 3. Pantalla de consulta del estado atmosférico

Para la sección del precio, seleccionamos un rango de fechas en días hábiles que ya hayan transcurrido y seleccionamos un mercado para consultar el precio ofertado, dato que ayuda al productor para decidir a quien le venderá su producto, si al intermediario o directo a la central de abastos. (Figura 4).



Fig. 4. Consulta de precio ofertado en sección precio

En el segmento de agroquímicos se indica brevemente cual es la función y el cuidado al usar productos químicos para el control de plagas (Figura 5)

ISSN en trámite



Fig. 5. Pantalla agroquímicos

Adicional, permite consultar la ficha técnica de agroquímicos permitidos y restringidos con la cantidad de agua y la dosis que se debe administrar (Figura 6).



Fig. 6. Productos químicos permitidos

En la parte posterior de la sección, describe rápidamente la variedad de plagas y el producto que las combate. (Figura 7).



Fig. 7. Plagas e insecticidas

Se hace mención de igual forma a las instituciones y organizaciones que aportaron para la realización de este proyecto (Fig. 8)



Fig. 8. Pantalla colaboradores

Con el uso de la aplicación persa, los productores mejoran sus ingresos al poder vender el producto al mejor costo, se reducen las pérdidas de cultivo por factores externos al igual que las incidencias y reciben asesoría técnica para tratar con agroquímicos.

Es importante comentar que la persona quien alimenta la información en el sistema es el productor de limón persa, ya que él es experto en el proceso de siembre cosecha del limón, y

ISSN en trámite

durante el desarrollo de la aplicación se contó con el apoyo de expertos en el área de agronomía y agricultura, así como académicos en el estudio del cambio climático, dando la oportunidad de enriquecer la funcionalidad y uso de la aplicación para que los usuarios finales pueden tener una herramienta móvil para mejorar el proceso de toma de decisiones para la producción del limón persa.

4. RECOMENDACIONES

Habilitar las fuentes desconocidas en dispositivos Android para realizar la instalación mediante el APK generado.

Contar con conexión a intermet.

Realizar la publicación de la app en la plataforma Play Store de Google para difusión entre los interesados.

Disponer de un dispositivo con buena resolución de pantalla para manipular la aplicación, y un sistema operativo Android en su versión 5.0 o superior.

5. CONCLUSIÓN

De acuerdo con la metodología empleada, se consiguió la aplicación móvil Persa de forma satisfactoria.

En la actualidad, con lo indispensable que son los dispositivos móviles inteligentes para la comunicación y como herramientas de productividad, es necesario el desarrollo de software que aporte a la agricultura, ya sea facilitando las tareas o la toma decisiones con la orientación para la realización de actividades; aportando a la mejora de calidad constante, creando competitividad que resulte en mejores ingresos para el agricultor y, por ende, a la economía nacional.

REFERENCIAS

Martínez Villalobos, G.; Flórez Méndez, D. y Bravo Osorio, N. (2018). Desarrollo de un sistema web y móvil para gestión de cultivos agrícolas. Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad, 10(18), 151-166. Rescatado en https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6303617.pdf

Sulca Martinez, C. L. (2016). Desarrollo de una aplicación móvil para el sector agrícola que permita mejorar el nivel de competitividad y producción con el uso de nuevas tecnologías. Rescatado en http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/16294/1/B_CISC_PTG.1125.Sulca%20Martinez%20Cristian%20Leonardo.pdf

Haro Santamaria, M. B. (2016). Desarrollo e implementación de una aplicación móvil para controlar el uso de agroquímicos en los cultivos de las comunidades del Cantón Guamote, provincia de Chimborazo, Ecuador. Rescatado en http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6284/1/18T00668.pdf

Corona Vidal, E. (2015). Factores que interfieren en la comercialización y producción de limón persa (citrus latifolia) en Cuitláhuac, Veracruz. Rescatado en https://www.uv.mx/veracruz/uvca366-agronegocios-sustentables/files/2013/12/Corona-Monografia-julio2015.pdf

Pressman, R. (2010). Ingeniería de software, un enfoque practico. 7ma Edición. McGraw-Hill.

INTAGRI. 2018. La Producción de Limón en México. Serie Frutales Núm. 41. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p. rescatado en https://www.intagri.com/articulos/frutales/la-produccion-de-limon-en-mexico

COPELP. 2016. ¿Quiénes somos? Rescatado en https://www.intagri.com/articulos/frutales/la-produccion-de-limon-en-mexico

ISSN en trámite

Algoritmos de flujo óptico en imágenes de baja resolución para navegación robótica

Luna Santander, Fernando Abisai*. Ruiz Ascencio, José. Pinto Elías, Raúl****
Magadan Salazar, Andrea. González Franco, Nimrod****

*TecNM/ CENIDET, Morelos, México
(e-mail: m21ce016@cenidet.tecnm.mx).
** TecNM/ CENIDET, Morelos, México
(e-mail: jose.ra, raul.pe, andrea.ms, nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: En este trabajo se implementan los algoritmos de flujo óptico Horn-Schunck y Lucas-Kanade utilizando imágenes de baja resolución con el fin de implementarlo en un sistema de navegación robótica que pueda realizar el proceso en tiempo real dentro de una placa de desarrollo con bajos recursos de procesamiento como las *Rapsberry Pi*. Se presenta la parte teórica de ambos algoritmos, así como su implantación utilizando un robot rodante. Por último, se presentan los resultados obtenidos al utilizar los algoritmos con una baja resolución.

Palabras clave: Flujo óptico, navegación autónoma, baja resolución

1. INTRODUCCIÓN

La visión robótica tiene objetivos cuyo denominador común es darles mayor autonomía a los robots. Sin embargo, los robots móviles con visión generan grandes cantidades de datos durante sus desplazamientos. Estas masas de datos generan problemas para su procesamiento en tiempo real.

Los algoritmos que más autonomía dan a un robot son los que realizan localización y mapeo simultáneo, o SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*). Dentro de los algoritmos de SLAM se encuentran los algoritmos basados en características y los métodos directos, dentro de estos últimos se encuentran los algoritmos de flujo óptico, de los cuales algunos son inspirados en la visión de los insectos.

Los insectos voladores se están estudiando en estos días como si fueran micro vehículos aéreos equipados con sensores inteligentes, que requieren muy pocos recursos cerebrales. Los hallazgos obtenidos en estos volantes naturales han demostrado ser extremadamente valiosos cuando se trata de diseñar sensores ópticos artificiales compactos de bajo peso capaces de realizar tareas de procesamiento visual de manera robusta en diversas condiciones ambientales (Serres & Viollet, 2018).

Inspirado en la noción de flujo óptico, desde finales de la década de los ‘90, los sensores de movimiento visual se han desarrollado y aplicado en una variedad de prototipos voladores (Duhamel *et al*., 2012) como los trabajos de Barrows & Neely (2000) y Green *et al.* (2003) donde desarrollaron sensores de flujo óptico para la navegación autónoma de pequeños robots aéreos.

Posteriormente aparecieron trabajos donde a través de imágenes consecutivas obtenidas de cámaras, datasets o simulaciones se obtiene el flujo óptico para sistemas de navegación de robots voladores como los trabajos de Agrawal *et al*. (2017) y Chirarattananon (2018) así también con robots rodantes como los trabajos de Dai & Li (2015), Yadav & Khandekar (2018), Meneses *et al.* (2018), y Skelton *et al.* (2019).

El propósito de este artículo es implementar los algoritmos de flujo óptico de Horn-Schunck (1980) y Lucas-Kanade (1981) utilizando imágenes de muy baja resolución, con el fin de reducir el costo computacional, que permitan la implantación de un sistema de visión robótica en tiempo real en computadoras con bajos recursos, los cuales pueden ser embebidos en pequeños vehículos aéreos (drones) o pequeños vehículos rodantes.

La idea es dar autonomía a robots pequeños, sin exigir precisión en el cálculo de su trayectoria. Requerimos detectar de forma gruesa el avance, retroceso y giro del robot, así como la presencia de obstáculos enfrente.

En la primera parte se presentó un breve estado del arte donde se mencionan los diferentes trabajos de navegación robótica que implementaron algoritmos de flujo óptico, posteriormente se presenta la parte teórica de los algoritmos de flujo óptico implementados, se continúa con la metodología propuesta para la aplicación de los algoritmos de flujo óptico en imágenes de baja resolución, posteriormente se presenta la experimentación y los resultados obtenidos y finalmente se presenta las conclusiones obtenidas.

ISSN en trámite

2. ALGORITMOS DE FLUJO ÓPTICO

El término flujo óptico (en inglés *optic flow*) se refiere a la velocidad a la que se mueve la textura en un plano focal de la imagen como resultado de movimiento relativo entre el observador y los objetos del entorno (Fig. 1).

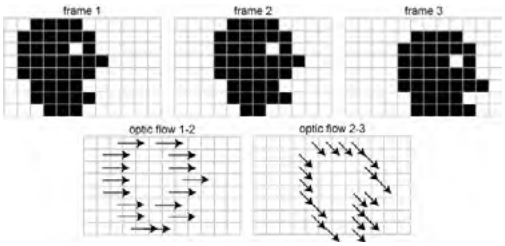


Fig. 1 Detección del flujo óptico en el plano de la imagen. El ejemplo muestra tres cuadros, que muestran el movimiento de la silueta de una cabeza. El flujo óptico se representa como la correspondencia de píxeles de contorno entre el cuadro 1 y 2, así como el cuadro 2 y 3.

El flujo óptico se formula típicamente como un campo vectorial sobre una imagen, en la que los vectores definen la velocidad a la que se mueve la textura en el plano de la imagen (Barrows & Neely, 2000).

De acuerdo con Sanahuja (2011) y de la Rosa-Vidal *et al.* (2020a) los algoritmos de cálculo de flujo se pueden clasificar en cuatro categorías principales: Algoritmos basados en técnicas diferenciales, algoritmos basados en la correspondencia (matching), algoritmos basados en análisis de frecuencia, algoritmos basados en el análisis de fase.

2.1. Ecuación de restricción de Flujo Óptico

La base del flujo óptico diferencial es la ecuación de restricción de movimiento que se describe a continuación.

Se propone que $I(x, y, t)$ es el pixel central en una vecindad de $n \times n$ pixeles, y se mueve una pequeña distancia $(\delta y, \delta x)$ en un tiempo (δt) hacía $I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$. Se dice entonces que $I(x, y, t)$ y su desplazamiento $I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$ son imágenes del mismo punto y por lo tanto tenemos:

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \qquad (1)$$

Esta suposición constituye la base de la ecuación de restricción del movimiento en 2D y se ilustra en la Fig. 2 (Barron, & Thacker, 2005).

La suposición se cumple en una primera aproximación (pequeñas traslaciones locales) siempre que $\delta x, \delta y, \delta t$ no sean demasiado grandes. Haciendo uso de una expansión en serie de Taylor de primer orden sobre $I(x, y, t)$ en la ecuación (1) y con el uso de las fórmulas mencionadas por Barron y Thacker (2005) se obtiene

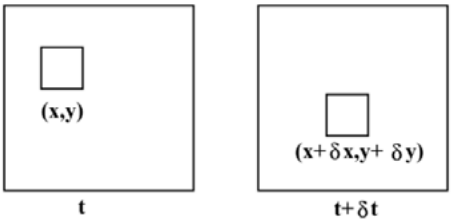


Fig. 2 Cambio de posición de un pixel en diferentes imágenes separadas por un tiempo *dt* (Barron & Thacker, 2005)

$$\frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \qquad (2)$$

Donde u y v son las componentes x y y de la velocidad de la imagen o flujo óptico y $\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial t}$ son las derivadas de la intensidad de la imagen en (x, y, t).

También se han introducido las abreviaturas adicionales I_x, I_y, e I_t para las derivadas parciales del brillo de la imagen con respecto a x, y y t, respectivamente.

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \qquad (3)$$

Más compactadamente, la ecuación (3) se escribiría:

$$(I_x, I_y) \cdot (v_x, v_y) + I_t = 0 \text{ ó } \nabla I \cdot \vec{v} + I_t = 0 \qquad (4)$$

Donde ∇I es el gradiente de intensidad espacial, $\vec{v}$ es el flujo óptico en el pixel (x, y) e I_t es la derivada temporal de la intensidad del brillo (Barron & Thacker, 2005).

2.1 Estimación de las derivadas parciales

Primero e independientemente del algoritmo de cálculo del flujo óptico se procede a estimar las derivadas de la luminosidad a partir del conjunto discreto de mediciones de luminosidad de la imagen disponibles. Aunque hay muchas fórmulas para la diferenciación aproximada para este proyecto se utiliza un conjunto que nos da una estimación de I_x, I_y y I_t. (Horn & Schunck, 1981).

$$I_x \approx \frac{1}{4}\{I_{i,j+1,k} - I_{i,j,k} + I_{i+1,j+1,k} - I_{i+1,j,k} + I_{i,j+1,k+1} - I_{i,j,k+1} + I_{i+1,j+1,k+1} - I_{i+1,j,k+1}\} \qquad (5)$$

$$I_y \approx \frac{1}{4}\{I_{i+1,j,k} - I_{i,j,k} + I_{i+1,j+1,k} - I_{i,j+1,k} + I_{i+1,j,k+1} - I_{i,j,k+1} + I_{i+1,j+1,k+1} - I_{i,j+1,k+1}\} \qquad (6)$$

$$I_t \approx \frac{1}{4}\{I_{i,j,k+1} - I_{i,j,k} + I_{i+1,j,k+1} - I_{i+1,j,k} + I_{i,j+1,k+1} - I_{i,j+1,k} + I_{i+1,j+1,k+1} - I_{i+,j+1,k}\} \qquad (7)$$

Las fórmulas antes mencionadas se pueden representar en máscaras de convolución para la imagen en t y $t + \delta t$ como se ve en la Fig. 3.

ISSN en trámite

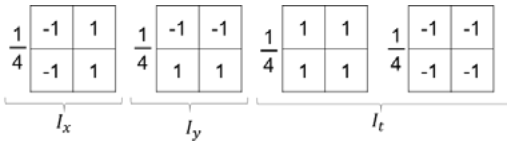


Fig. 3 Kernels utilizados para las derivaciones parciales en **x, y** y **t**

2.2 Algoritmo de Horn-Schunck

Este algoritmo propone una forma de determinar el flujo óptico basada en el cálculo de los gradientes espaciales y temporales con iteraciones.

Este método considera que, si para cada punto del patrón de brillo puede moverse de forma independiente, hay pocas esperanzas de recuperar la velocidad. En este caso, los puntos vecinos de los objetos tienen velocidades similares y el campo de velocidad de los patrones de brillo en la imagen varía suavemente en casi todas partes. Se pueden esperar discontinuidades en el flujo cuando un objeto ocluye a otro (Horn & Schunck, 1981).

El método combina la ecuación de restricción de flujo óptico (4) con el término de regularización para estimar el campo de velocidad $\vec{v} = (v_x, v_y)$ y minimizando la cantidad de error al cuadrado queda la siguiente ecuación:

$$E(x,y) = \int_D (\nabla I \cdot \vec{v} + I_t)^2 + \alpha^2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)^2 \right] dxdy \quad (8)$$

Dónde las derivadas parciales son los términos de error, y α es un factor de suavidad que se agrega para completar la ecuación de restricción de flujo óptico (Barranco *et al.*, 2017).

Las ecuaciones iterativas son utilizadas para minimizar la ecuación (8) y la velocidad de la imagen puede obtenerse a partir de las ecuaciones de Gauss Seidel que resuelven las ecuaciones de Euler-Lagrange adecuadas:

$$u^{n+1} = \bar{u}^n - I_x [I_x \bar{u}^n + I_y \bar{v}^n + I_t]/(\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2) \quad (9)$$

$$v^{n+1} = \bar{v}^n - I_y [I_x \bar{u}^n + I_y \bar{v}^n + I_t]/(\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2) \quad (10)$$

Donde $\bar{u}$ y $\bar{v}$ son los promedios locales y se definen como sigue:

$$\bar{u}_{i,j,k} = \frac{1}{6}\{u_{i-1,j,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i+1,j,k} + u_{i,j-1,k}\} + \frac{1}{12}\{u_{i-1,j-1,k} + u_{i-1,j+1,k} + u_{i+1,j+1,k} + u_{i+,j-1,k}\} \quad (11)$$

$$\bar{v}_{i,j,k} = \frac{1}{6}\{v_{i-1,j,k} + v_{i,j+1,k} + v_{i+1,j,k} + v_{i,j-1,k}\} + \frac{1}{12}\{v_{i-1,j-1,k} + v_{i-1,j+1,k} + v_{i+1,j+1,k} + v_{i+,j-1,k}\} \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) se representan como máscaras de convolución como se muestra en la Fig. 4.

1/12	1/6	1/12
1/6	-1	1/6
1/12	1/6	1/12

Fig 4. El laplaciano se estima restando el valor de un punto de una media ponderada de los valores de los puntos vecinos. Aquí se muestran los pesos adecuados por los que se pueden multiplicar los valores (Horn & Schunck, 1981).

2.3 Algoritmo de Lucas-Kanade

El método de Lucas y Kanade obtiene el flujo óptico por el principio de estimación de mínimos cuadrados. La suposición en este caso es que los puntos vecinos de un punto específico del objeto varían suavemente y poseen exactamente la misma velocidad. La ecuación de constancia del brillo (4) puede representarse en formato de matriz como

$$\nabla I^T U = -I_t \quad (13)$$

donde, $\nabla_I = [I_x\, I_y]^T$ y $U = [u\, v]^T$. Por lo tanto, la estimación por mínimos cuadrado de la función de error se puede escribir como

$$\xi(u,v) = \Sigma\Sigma[I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t) + I(x,y,t)]^2 \quad (14)$$

Suponiendo que el desplazamiento es pequeño y aproximadamente constante dentro de la vecindad de un punto del objeto, la expansión de Taylor de $I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t)$ seria:

$$I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t) = I(x,y,t) + u\frac{\partial I}{\partial x} + v\frac{\partial I}{\partial y} + \frac{\partial I}{\partial t} \quad (15)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (16) se obtiene,

$$\xi(u,v) = \Sigma\Sigma\,[uI_{xi} + vI_{yi} + I_{ti}] \quad (16)$$

Ahora, el valor optimizado de las velocidades del flujo se logrará minimizando esta función de error con respecto a **u** y **v**. Esto dará lugar a un sistema de ecuaciones lineales, cuya representación matricial producirá la siguiente forma estándar de Lucas–Kanade (Basak *et al.*, 2012):

$$\begin{bmatrix} \Sigma I_{xi}^2 & \Sigma I_{xi}^2 I_{yi}^2 \\ \Sigma I_{xi}^2 I_{yi}^2 & \Sigma I_{yi}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Sigma I_{xi} I_{ti} \\ -\Sigma I_{yi} I_{ti} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Finalmente aplicando las propiedades de las matrices y los productos matriciales correspondientes se obtiene:

$$u = \frac{-\Sigma I_{yi}^2 \Sigma I_{xi} I_{ti} + \Sigma I_{xi} I_{yi} \Sigma I_{yi} I_{ti}}{\Sigma I_{xi}^2 \Sigma I_{yi}^2 - (\Sigma I_{xi} I_{yi})^2} \quad (18)$$

$$v = \frac{\Sigma I_{xi} I_{ti} \Sigma I_{xi} I_{yi} - \Sigma I_{xi}^2 \Sigma I_{yi} I_{ti}}{\Sigma I_{xi}^2 \Sigma I_{yi}^2 - (\Sigma I_{xi} I_{yi})^2} \quad (19)$$

ISSN en trámite

El cálculo de estas velocidades de flujo óptico de **u** y **v** involucran un pixel central y una cantidad de vecinos elegida por el usuario. Para este proyecto se utiliza el tamaño de la altura de la ventana (3×3, 7×7, 15×15 pixeles) para abarcar todos los pixeles de la ventana y que no queden cálculos incompletos.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

Para la implantación del sistema de navegación mediante los algoritmos de Horn-Schunck (1981) y Lucas-Kanade (1981) se definió una serie de pasos que se muestra en la Fig. 5.

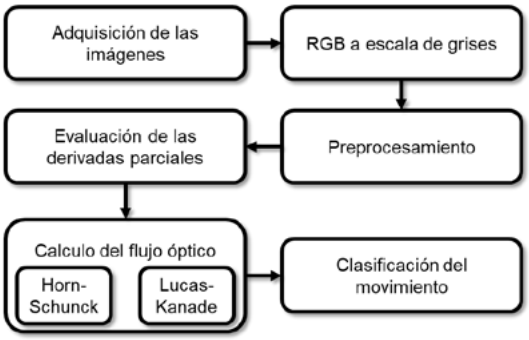


Fig. 5. Proceso empleado para la obtención del flujo óptico

3.1 Uso de ventanas de baja resolución

Como se ha mencionado anteriormente, la aplicación de los algoritmos de flujo óptico tiene un gran costo computacional al utilizar imágenes de alta resolución. Para reducir el tiempo de procesamiento se experimentó el uso de partes (ventanas) de la imagen obtenida de la cámara, teniendo dos ventanas que muestran el flujo óptico. Dado las medidas de las ventanas utilizadas (mostradas en la Tabla 1), la resolución de 160×128 pixeles cumple para que las ventanas abarquen diferentes partes de la imagen sin llegar a ocluirse.

3.2 Detección del movimiento mediante el cálculo del flujo óptico

Una vez teniendo las ventanas se aplica el algoritmo deseado, ya sea el algoritmo de Horn-Schunck o Lucas-Kanade, con el algoritmo 1 con el cual se calcula el flujo óptico en **u** y **v** para las dos ventanas. Para los movimientos empleados por el robot rodante se espera un comportamiento grafico como se muestra en la Fig. 6 donde con los valores de flujo óptico se puedan detectar los movimientos básicos de desplazamiento hacia adelante o atrás, así como de giro a la derecha o izquierda.

Algoritmo 1. Detección del movimiento mediante el cálculo del flujo óptico en ventanas de baja resolución.

Datos: Tamaño y ubicación de las dos ventanas, cantidad de fotogramas por segundo.

Resultado: Valores de flujo óptico en las dos ventanas

Inicio

1. Se configura la resolución y fotogramas por segundo para el módulo de cámara
2. **Hacer**
   - 2.1 Se obtienen dos cuadros con un tiempo de separación (1/30 segundo).
   - 2.2 Se obtienen las ventanas de los dos cuadros
   - 2.3 Se obtienen las derivadas parciales en ambas ventanas.
   - 2.4 **Para** cada una de las ventanas
     - 2.4.1 Se calcula el flujo óptico de la ventana con el algoritmo de Horn- Schunck o Lucas-Kanade
   - 2.5 **Fin**
   - 2.6 Se despliegan gráficamente los vectores de flujo óptico.
   - 2.7 Con los valores de flujo óptico se clasifica el movimiento.
3. **Mientras** no se presione la tecla escape (ESC)

Fin

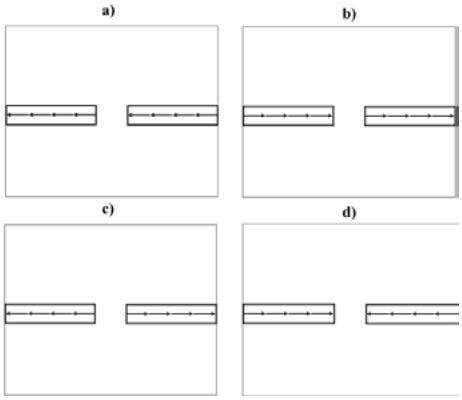


Fig. 6 Comportamiento esperado de la componente horizontal de flujo óptico ante los movimientos de a) desplazamiento a la derecha, b) desplazamiento a la izquierda, c) hacia adelante (acercamiento) y d) hacia atrás (alejamiento).

4. EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS

4. 1 Diseño y desarrollo de robot rodante

Para las pruebas de funcionamiento de los algoritmos implementados se realizó el diseño y desarrollo de un robot rodante que pudiera realizar desplazamiento en dos dimensiones utilizando una arquitectura de dos ruedas motrices y una rueda pasiva (Ver robot en la Fig. 7 y conexiones en la Fig. 8.). Para eso, se hizo uso de una *Rapsberry Pi 3B+* para el proceso de cálculo de flujo óptico con las secuencias de imágenes obtenidas del módulo de cámara v2, así también se hizo uso de la placa de

ISSN en trámite

desarrollo ESP32 y el módulo L298N para el control de los motorreductores.

4.2 Detección del movimiento

Para la detección del movimiento, con el algoritmo 1 analizamos el comportamiento de los valores de flujo óptico ante los desplazamientos, que se aprecian de manera gráfica en la Fig. 9.

4.3 Resultados

La implementación se hizo en el lenguaje de programación Python 3 y haciendo uso de la librería OpenCV. Todo esto fue ejecutado desde una *Rapsberry Pi 3B+*, una computadora de placa simple (SBC) conocida por su bajo costo la cual tiene un procesador que funciona a 1.4 Ghz y 1 GB de RAM.

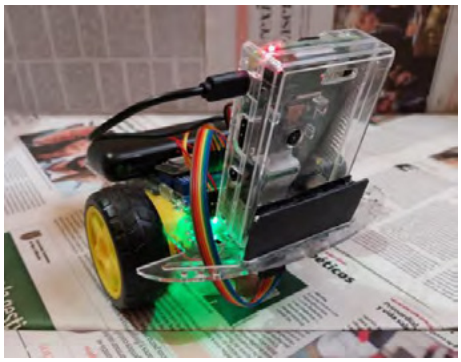


Fig. 7 Vista del robot rodante

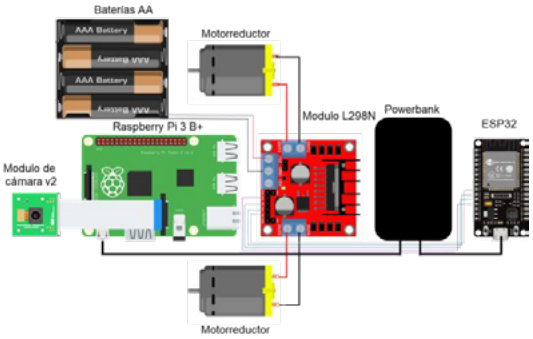


Fig. 8 Diagrama de conexiones entre los componentes del robot móvil

Con el fin de tener una detección de movimiento fiable con los valores de flujo óptico y hacer una comparación de tiempos de procesamiento se realizaron pruebas de los algoritmos de Horn-Schunck o Lucas-Kanade con diferentes tamaños de ventanas obteniendo los resultados de la Tabla 1.

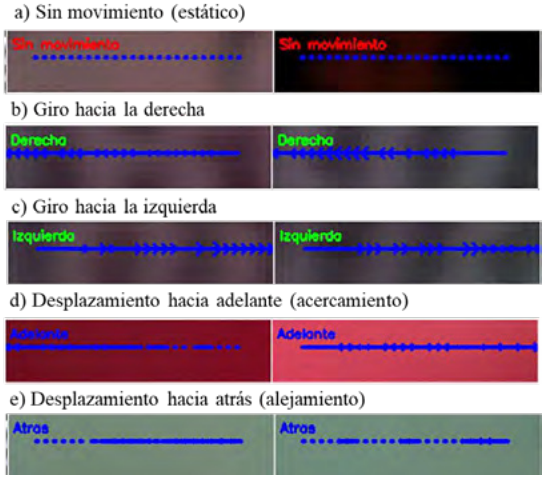


Fig. 9 Comportamiento de los valores de flujo óptico obtenidos con el algoritmo de Lucas-Kanade usando dos ventanas de 7×30 pixeles.

Tabla 1. Desempeño de los algoritmos de flujo óptico implementados

Algoritmo	Tamaño de ventana utilizado	Puntos de flujo óptico por ventana	Velocidad de procesamiento por cada dos fotogramas
Lucas-Kanade	3 × 30	28	>0.12s aprox.
	7 × 30	18	>0.12s aprox.
	15 × 30	16	>0.13s aprox.
Horn-Schunck	3 × 30	28	>0.06s aprox.
	7 × 30	140	>0.08s aprox.
	15 × 30	364	>0.13s aprox.

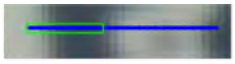
Con las pruebas realizadas se obtuvo que al utilizar ventanas con dimensiones de 3×30 pixeles los algoritmos de flujo óptico suelen dar resultados poco fiables (por ejemplo, detectar falsos movimientos cuando el vehículo se encuentra estático). Por lo que con ventanas de 7×30 y 15×30 se obtienen resultados más sólidos en ambos algoritmos.

En cuanto a los tiempos de procesamiento mostrados en la Tabla 1 estos coinciden con el trabajo de McCarthy & Bames (2004) con respecto a que el algoritmo de Horn-Schunck tiene un menor tiempo de ejecución que el algoritmo de Lucas-Kanade. Sin embargo, no se puede hacer una comparación con los resultados obtenidos en la literatura ya que estas fueron realizadas con imágenes completas de la cámara las cuales fueron procesadas en computadoras con recursos superiores a las utilizadas en este proyecto.

ISSN en trámite

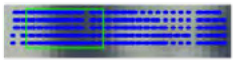
En cuanto a los valores de flujo óptico obtenido de los algoritmos seleccionados, el algoritmo de Horn-Schunck obtiene una mayor cantidad de valores de flujo óptico, lo que proporciona más información al momento del análisis, sin embargo, el algoritmo de Lucas-Kanade a pesar de contar con menos información, presenta valores más homogéneos dado que su proceso convoluciona una mayor cantidad de pixeles. Sin embargo, ambos algoritmos muestran valores similares ante el mismo movimiento como se muestra en la Fig. 10.

Lucas-Kanade



2.2276	2.3071	2.2694	2.2414	2.2553	2.2611	2.2763	2.1306	2.0681	2.1397

Horn-Schunck



1.9052	2.1340	2.2175	2.5317	2.4777	1.8713	1.1373	9.5867	1.3966	1.8644
1.8315	2.0184	2.1476	2.5338	2.5183	1.9373	2.1031	9.3288	1.4095	1.9851
1.8552	1.8811	2.1477	2.4841	2.5072	1.9705	1.5744	5.4892	1.6490	1.8436
1.8540	1.9107	2.0383	2.4336	2.3030	2.0353	1.7018	1.2488	1.3895	1.6505
1.8461	1.9537	2.0363	2.4055	2.2509	2.1031	1.8205	1.3329	1.1842	1.6306

Fig. 10 Valores de flujo óptico en **u** (componente horizontal) obtenidos con el algoritmo de Lucas-Kanade y Horn-Schunck en un fragmento de ventana de 7×30 pixeles, con un giro hacia la izquierda.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del flujo óptico de los algoritmos de Horn-Schunck y Lucas-Kanade son buenos en cuanto a los tiempos de procesamiento que permite poder obtener resultados fiables del estado del vehículo rodante en tiempo real. Asimismo, con los valores de flujo óptico obtenidos es posible tener el estado de un robot rodante en tiempo real haciendo uso de fragmentos (ventanas) de la imagen, empleando una baja resolución y haciendo uso de arquitectura abierta como es la *Rapsberry Pi*. Queda para un trabajo futuro medir el desempeño de ambos algoritmos en la detección de obstáculos para poder definir que algoritmo es el indicado para utilizar en el sistema de navegación autónoma.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) así como al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) su patrocinio parcial a este proyecto.

REFERENCIAS

Agrawal, P., Ratnoo, A., & Ghose, D. (2017). Inverse optical flow-based guidance for UAV navigation through urban canyons. *Aerospace Science and Technology*, 68, 163-178.

Barranco Medina, M.F., Ramírez Ortíz, S.M. (2015). *Detección de movimiento mediante el uso de flujo óptico*. Tesis (Licenciatura en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, Ciudad de México.

Barrows, G. L., & Neely, C. (2000). Mixed-mode VLSI optic flow sensors for in-flight control of a micro air vehicle. *Critical Technologies for the future of Computing*, International Society for Optics and Photonics, 4109, 52-63.

Barron, J. L., & Thacker, N. A. (2005). *Tutorial: Computing 2D and 3D optical flow.* Imaging science and biomedical engineering division, Medical School, University of Manchester.

Basak, K., Manjunatha, M., & Dutta, P. K. (2012). Pyramidal Refinement of Lucas-Kanade Optical Flow based Tracking of Peripheral Air Embolism in OCT Contrast Imaging. *International Journal of Computer Applications*, 52(12), 7-12.

Chirarattananon, P. (2018). A direct optic flow-based strategy for inverse flight altitude estimation with monocular vision and IMU measurements. *Bioinspiration & biomimetics*, 13(3), 1-18.

Dai, B., & Li, W. (2014). Obstacle Avoidance Based on Optical Flow for Mobile Robots in Unknown Environment. *2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2, 599-602. IEEE.

Duhamel, P. E. J., Perez-Arancibia, C. O., Barrows, G. L., & Wood, R. J. (2012). Biologically inspired optical-flow sensing for altitude control of flapping-wing microrobots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(2), 556-568.

Green, W. E., Oh, P. Y., Sevcik, K., & Barrows, G. (2003). Autonomous landing for indoor flying robots using optic flow. *ASME international mechanical engineering congress and exposition*, 37130, 1347-1352.

Horn, B. K., & Schunck, B. G. (1981). Determining optical flow. *Artificial intelligence*, 17(1-3), 185-203.

McCarthy, C., & Bames, N. (2004). Performance of optical flow techniques for indoor navigation with a mobile robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004*. 5, 5093-5098. IEEE.

Meneses, M. C., Matos, L. N., & Prado, B. O. (2018). Low-cost Autonomous Navigation System Based on Optical Flow Classification. *arXiv preprint arXiv:1803.03966.*

Serres, J. R., & Viollet, S. (2018). Insect-inspired vision for autonomous vehicles. *Current opinion in insect science*, 30, 46-51.

Yadav, N. D., & Khandekar, S. (2018). Overview of Optical Flow Technique for Mobile Robot Obstacle Avoidance. *2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (*ICCES),619-622. IEEE

ISSN en trámite

Reconocimiento del limite de grano en una aleación ternaria mediante solución de los eigenvalores en una metalografía ⋆

Alexis V. Vázquez Esquivel * **Israel Aguilera Navarrete** **
Beatriz Juárez Campos *** **Elena I. Kaikina** ****

* *DCI, TecNM-Instituto Tecnológico de Morelia, Mich. México*
(e-mail: d09120856@morelia.tecnm.mx)
** *CONACYT, TecNM-Instituto Tecnológico de Morelia, Mich. México*
(e-mail: iaguilerana@conacyt.mx)
*** *DCI, TecNM-Instituto Tecnológico de Morelia, Mich. México*
(e-mail: beatriz.jc@morelia.tecnm.mx)
**** *UNAM-Centro de Ciencias Matematicas, Mich. México*
(ekaikina@matmor.unam.mx)

Abstract: El procesamiento de imágenes continuamente se expande a más áreas de la ciencia, gracias a la versatilidad y al crecimiento en el número de aplicaciones en diversas áreas. En este trabajo identificamos que las técnicas de procesamiento de imágenes se pueden aplicar a la ciencia de los materiales específicamente en el análisis y procesamiento de las imágenes micrográficas de materiales metálicos con el fin de cuantificar indirectamente propiedades físicas y químicas del material. En el trabajo se presenta con rigor matemático suficiente para demostrar que las imágenes metalográficas homogeneizadas mediante sus histogramas, transformadas a escala de grises, filtradas, y binarizadas, facilitan notablemente la identificación de los límites de los granos mediante el algoritmo de Harris. Los resultados presentados son las imágenes procesadas en las que se identifican las fases de una aleación ternaria.

Keywords: Análisis microestructural, Procesamiento de imagen, Identificación y modelado, Control avanzado de procesos, Medida e instrumentación, eigenvalores.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnologías computacionales actuales repercuten en la evolución de las técnicas de tratado y procesamiento de la información en todas las ramas de la ciencia. En este trabajo se destacan las técnicas enfocadas en el procesamiento de imágenes, las cuales Thanki and Kothari (2018) definen como un conjunto de procesos que involucran desde la adquisición, el mejoramiento, la caracterización y la creación de imágenes. El procesamiento de imágenes cada vez se expande a mas áreas de la ciencia, gracias a la versatilidad y el crecimiento en el número de aplicaciones en otras áreas.

El área de oportunidad que identificamos para las técnicas de procesamiento de imágenes se encuentra en la ciencia de los materiales, el cual es explicado en Vázquez et al. (2020a). Mas específicamente donde el uso de diversas técnicas y metodologías buscan la descripción de las propiedades físicas y químicas de un material. En detalle para dichas técnicas se encuentran las dedicadas a la obtención de información microestructural. Y como caso de estudio, los análisis metalográficos. Estos análisis consisten en procesamiento óptico analógico de las imágenes micrograficas de un material metálico, obtenidas con el propósito de revelar los constituyentes del material, y así obtener información tal como, la morfología, la distribución y el tamaño de los microconstituyentes. Vázquez et al. (2019) menciona que las imágenes metalográficas son obtenidas mediante técnicas de microscopia, las cuales serán utilizadas en función de la naturaleza del material y de la información que se desea obtener.

Para explicar lo mencionado anteriormente, se presenta en la Fig. 1 una metalografía obtenida mediante microscopia electrónica de barrido, de una aleación ternaría $Zn - Al - 4\%Ag$, donde las fases constituyentes del material pueden identificarse entre si mediante el contraste en su colometría, dichos colores y tonalidades son inherentes a la técnicas de microscopia utilizada para su caracterización. para efectos prácticos del presente trabajo se describen las fases constituyentes de la aleación a continuación: fase α fase rica en Al, fase η la cual es la fase con mayor porcentaje de Zn y finalmente la fase intermetálica ε, el cual es un microstuyente con la estequiometría $AgZn_3$.

La importancia de este trabajo se justifica por lo mencionado por Mondragón et al. (2019), ya que en cada proceso industrializado en la actualidad tiene una repercusión en la microestructura del material, es por ello que desarrollar herramientas que permitan la caracterización de materiales de manera rápida y eficiente es de gran

⋆ Programa beca nacional CONACYT número 760955 en TecNM/Instituto Tecnológico de Morelia y Programa de Cátedras CONACYT número 3219.

ISSN en trámite

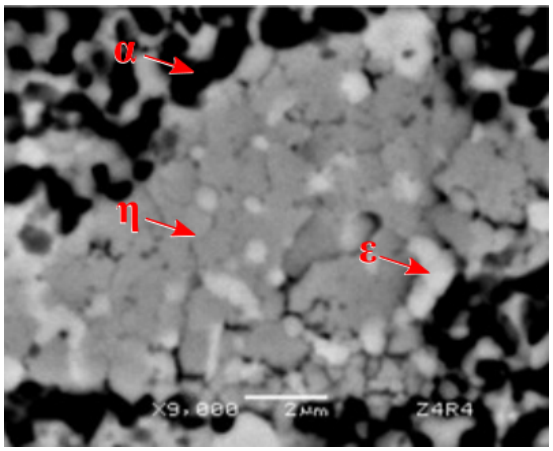


Fig. 1. Metalografía de la aleación ternaría $Zn-Al-4\%Ag$

importancia. Este trabajo plantea una metodología para identificar las fronteras de los granos de un material, esta metodología es estructurada en tres etapas, las cuales se programaron en el software libre Scilab y que se presentarán a continuación.

2. PRE-PROCESAMIENTO DE IMAGEN

Primeramente, antes de realizar técnicas de procesamiento de imagen, es recomendable el filtrado y estandarización de datos. Esto con el propósito de evitar problemas de complejidad y garantizar la rapidez del procesamiento. De este modo, es imperativo introducir la definición de una imagen, la cual Gonzalez et al. (2009) definen como un conjunto finito de pixeles, donde cada pixel representa un elemento o conjuntos de elementos en la imagen. Por ello una imagen puede ser definida a su vez como una matriz de pixeles de MxN en donde M y N representan a las columnas y renglones de la matriz respectivamente.

Todas las operaciones realizadas en una imagen se realizan mediante la definición de la función del plano $I(u,v)$, donde u y v representan la localización de los elementos en la imagen a los cuales se les realizara la operación deseada.

2.1 Mejoramiento de histogramas

En una imagen, un histograma describe la frecuencia de los valores de intensidad de cada pixel dentro de una imagen, Jain et al. (1995). El histograma de una imagen no codifica información sobre donde se encuentra cada pixel, pero es útil para representar la información de la imagen de manera estadística. Se define entonces que, el histograma h de una imagen I con intensidad de valores en un rango $I(u,v) \in [0, k-1]$, donde k se refiere al valor máximo posible de los pixeles dentro de la imagen. Se puede definir entonces, que

$$h(i) = card\{(u,v)|I(u,v) = i\} \tag{1}$$

Al tener la información ordenada mediante la utilización del histograma, es posible entonces la realización de operaciones de promedio y varianza. definiéndose entonces el valor promedio μ de una imagen I de tamaño (MxN) como

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{1}{MN}\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} I(u,v) \\ &= \frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{k-1} h(i)\cdot i\end{aligned} \tag{2}$$

Análogamente también se puede calcular la varianza del valor de los pixeles del histograma como

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \frac{1}{MN}\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}[I(u,v)-\mu]^2 \\ &= \frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{k-1}(i-\mu)^2 h(i)\cdot i\end{aligned} \tag{3}$$

En la Figura 2, se presenta la aplicación de las ecuaciones anteriores dentro de la metalografía de la Figura 1. En la Figura 2 a), se presenta la metalografía original y su histograma representativo, el cual se obtiene aplicando la ecuación 1 en la metalografía original. En la Figura 2 b) se ajustaron niveles de brillo alto, aumentando valores por arriba del promedio, para la Figura 2 c) se muestra un ajuste equilibrado en los niveles de brillo y contraste. Finalmente para la Figura 2 d) se representa la imagen e histograma con valores modificados en su contraste. Como resultado de estos ajustes se optó por utilizar la imagen 2 c) para el resto del trabajo, siendo este el ajuste óptimo.

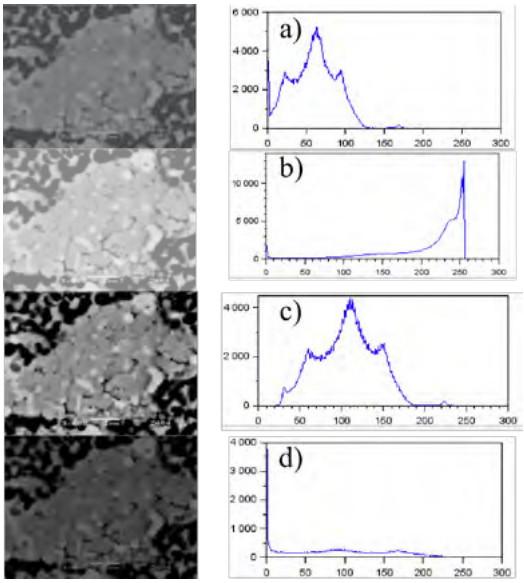


Fig. 2. Ajuste de histogramas

2.2 Transformación de canal RGB a escala de grises

Dado que la información de los pixeles esta estandarizada y ordenada mediante la utilización del ajuste del histograma de la Figura 2 c), se procede a optimizar la información, esto mediante la transformación del canal RGB de la imagen a una escala de grises. A continuación, se presentan las operaciones necesarias para la realización de la transformación. Partiendo de que una imagen está compuesta por

ISSN en trámite

colores, se dispone entonces que existen matrices separadas con las dimensiones MxN idénticas a la imagen original, de este modo se puede definir que una imagen compuesta por un canal RGB del siguiente modo

$$I_{color} = (I_R, I_G, I_B) \tag{4}$$

Los valores RGB de la imagen a color I en la posición (u, v) son obtenidos accediendo a los tres componentes de la imagen de la forma

$$\begin{pmatrix} R(u,v) \\ G(u,v) \\ B(u,v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_R(u,v) \\ I_G(u,v) \\ I_B(u,v) \end{pmatrix} \tag{5}$$

Mediante la Ecuación 5, se puede extraer cada canal de la imagen y operarla de manera individual, esto permite entonces realizar una operación que permite crear una nueva matriz pero ahora con los valores distintos al canal RGB. Esta operación se conoce como transformación de canal RGB a escala de grises, teniendo la forma siguiente

$$I_{Gs} = 0.299 \cdot I_R(u,v) + 0.587 \cdot I_G(u,v) + 0.114 \cdot I_B(u,v) \tag{6}$$

donde, I_{Gs} se refiere a la imagen en la escala de grises obtenida, resultado de productos en los canales $I_R(u, v)$, $I_G(u, v)$ y $I_B(u, v)$. Esto permite que todo pixel dentro de la imagen contenga ahora valores en un rango de $I(u, v) \in [0, 255]$, lo cual reduce considerablemente los valores de los pixeles a trabajar, lo que permite agilizar las operaciones posteriores, como se observa en Güneş et al. (2016).

3. PROCESAMIENTO DE IMAGEN

Una vez que la información de los pixeles ha sido simplificada con el ajuste a escala de grises, se puede proceder al procesamiento de imágenes. Para esto, se define al procesamiento de imágenes como una función de variables x y y, siendo estas dos variables la cardinalidad de los elementos dentro de una imagen. Dado lo anterior todo método para un procesamiento de imagen puede ser representado usando la Ec. 7.

$$g(x, y) = P(f(x, y)) \tag{7}$$

Donde $f(x, y)$ se entiende como la imagen a procesar o imagen de entrada, $g(x, y)$ como el procesamiento y P es el operador del procesamiento al que la imagen de entrada fue sometida.

3.1 Binarización y filtrado de fases

Con la identificación de regiones en una imagen se pueden reconocer objetos. Esto es porque cada objeto es identificable dentro de una imagen por regiones de pixeles con valores similares o iguales. Por ello se dice que dentro de una imagen existen subimagenes o particiones, donde idealmente, cada partición representa un objeto o parte de un objeto diferente. Entonces se puede definir que una imagen completa es una unión de particiones

$$\bigcup_{i=1}^{k} P_i \tag{8}$$

Donde, P_i son las particiones u objetos dentro de la imagen y la unión de todas estas particiones $P_i, \ldots P_k$ ensambladas da como resultado a la imagen completa.

Para la identificación de la partición P_i, se recomienda entonces establecer limites de valores dentro de la escala de valores a trabajar, para este trabajo, entonces se establecen los límites dentro del rango de 0 a 255 que es la escala de grises trabajada anteriormente. Esta operación permite que se distinga el fondo del objeto reconocido mediante contraste, por lo tanto, utilizando la definición de la Ecuación 7 se puede definir a la operación de binarización como

$$B(u, v) = I_{GsT}(u, v) \tag{9}$$

Siendo $B(u, v)$ la imagen binarizada, $I_{GsT}(u, v)$ la imagen en escala de grises con los limites T de reconocimiento de particiones P_i. Al ser el objetivo a aislar las fases dentro de la Figura 1 se puede entonces definir entonces una función para la identificación de fases de acuerdo a su valor en la escala de grises

$$I_{GsT}(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{si } I_{Gs}(u, v) \leq T \\ 0, & \text{si otro caso} \end{cases} \tag{10}$$

De esta manera, cuando una región de pixeles que corresponde con valores intermedios entre otras dos regiones distintas, la forma de la Ecuación 10 se entiende como

$$I_{GsT}(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{si } T_1 \leq I_{Gs}(u, v) \leq T_2 \\ 0, & \text{si otro caso} \end{cases} \tag{11}$$

donde, T_1 y T_2 son limitantes que existen entre las regiones que se requiere binarizar. Utilizando las ecuaciones 10 y 11 en la imagen $I_{GsT}(u, v)$ de la metalografía, con limites T_1 y T_2 de 90 y 180 respectivamente, Vázquez et al. (2020b) menciona que se puede obtener un filtrado de las fases de la metalografía original, la cual se presenta en la Figura 3.

4. REVELADO DE LIMITES DE GRANO

Como se observa en la Figura 3, se obtienen tres nuevas imágenes que representan la detección propia de las fases en la metalografía, el siguiente paso consiste en la revelación del límite de grano de cada una de las fases, para ellos se utiliza la metodología basada en el detector de esquinas de Harris.

4.1 Solución de los eigenvalores

Para la solución de los eigenvalores se utiliza la función de autocorrelación local que mide los cambios locales dado un desplazamiento $(\triangle x, \triangle y)$ y un punto, (x, y) al igual que en Harris and Stephens (2013). La función de autocorrelación se define por la Ecuación 12.

$$C(x, y) = \sum_{W} [I(x_i, y_i) - I(x_i + \triangle x, y_i + \triangle y)]^2 \tag{12}$$

ISSN en trámite

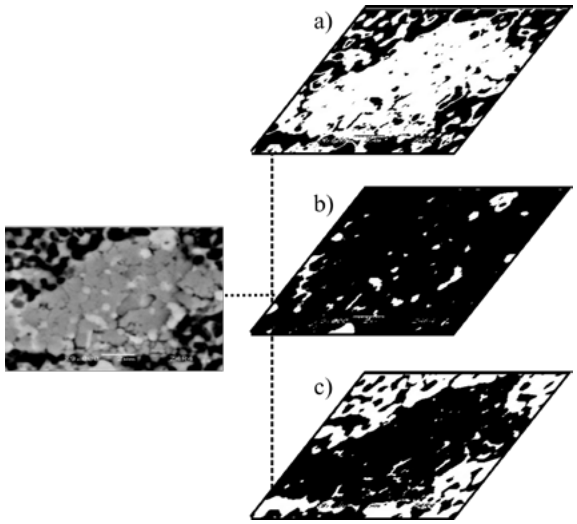


Fig. 3. Filtrado de fases aplicado, a) fase η, b) fase ε y c) fase α

Donde la matriz $C(x, y)$ captura la estructura de intensidad del vecindario local, I denota la función de plano de la imagen y (x_i, y_i) son puntos en la función del plano, W es un operador Gaussiano de la forma $e^{-(x^2+y^2)}/\ 2\sigma^2$ centrado en un punto (x, y), El cual mide los cambios locales de la imagen mediante el desplazamiento en diferentes direcciones Malik et al. (2011). En la Ecuación 13 el cambio en la imagen $I(x_i + \triangle x, y_i + \triangle y)$ es aproximado por una serie de Taylor de primer orden.

$$I(x_i, y_i) + [I_x(x_i, y_i) I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \triangle x \\ \triangle y \end{bmatrix} \tag{13}$$

Sean I_x y I_y las derivadas parciales en x y y, respectivamente.

$$I_x = I * [-1, 0, 1] \approx \frac{\partial I}{\partial_x} \tag{14}$$

$$I_x = I * [-1, 0, 1]^T \approx \frac{\partial I}{\partial_y} \tag{15}$$

Denotando mediante el simbolo $*$ la convolución. Sustituyendo la aproximación de la Ecuación 13 en la Ecuación 12, obtenemos. Desarrollando 13 obtendremos la Ecuación 16.

$$\sum_W \left[-[I_x(x_i, y_i) I_y(x_i, y_i) \begin{bmatrix} \triangle x \\ \triangle y \end{bmatrix} \right]^2 \tag{16}$$

Al tener el Gausiano W con un símbolo negativo presente en el exponente, la Ecuación 17.

$$\sum_W \left[[I_x(x_i, y_i) I_y(x_i, y_i) \begin{bmatrix} \triangle x \\ \triangle y \end{bmatrix} \right]^2 \tag{17}$$

Desarrollando el cuadrado de la Ecuación 17 e introduciendo la sumatoria para cada elemento en la matriz, obtendremos.

$$\begin{bmatrix} \sum_W (I_x(x_i, y_i))^2 & \sum_W I_x(x_i, y_i) I_y(x_i, y_i) \\ \sum_W I_x(x_i, y_i) I_y(x_i, y_i) & \sum_W (I_y(x_i, y_i))^2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

Definiendo la Ecuación 18 como M y a la vez redefiniendo los elementos locales de la estructura de la matriz se tendrá la siguiente Ecuación, mencionada en Burger and Burge (2015) y Gueguen and Pesaresi (2011).

$$M = \begin{pmatrix} A & C \\ C & B \end{pmatrix} \tag{19}$$

De este modo se dice que la matriz M describe la forma de la autocorrelación como resultado de aplicar el operador W en cada una de las locaciones de la imagen. Siendo α y β los valores propios de M, donde estos valores pueden proveer una descripción cuantitativa de como la autocorrelación mide los cambios en el espacio. De acuerdo a los valores propios de la matriz M, las regiones en una imagen pueden ser divididas en tres regiones, Figura 4.

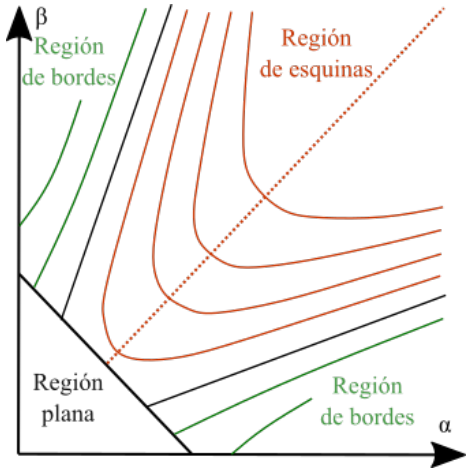


Fig. 4. Regiones de los valores propios de acuerdo a los valores α y β, Dey et al. (2012)

Donde para cada región tenemos los siguiente criterios

1 Region plana: $\alpha \approx 0$ y $\beta \approx 0$.
Ambos valores propios son pequeños, por lo tanto la variación en la intensidad es despreciable en cualquier dirección. En este caso las regiones pueden ser consideradas en su mayoría como planas.
2 Bordes: $\alpha \gg \beta$.
La diferencia entre ambos valores propios es grande, tal que la variación en la intensidad es notable solo en una dirección.
3 Esquinas: $\alpha \approx \beta$ con $\alpha\beta \gg 0$
La variación en las intesidad es fuerte a lo largo de todas direcciones, tal que es usualmente lograda por regiones con lugares pequeños

Sin embargo, además de las regiones de clasificación de esquinas y bordes, también se necesita una medida de su calidad o respuesta. Teniendo en cuenta que el producto $\alpha\beta$ es sensible a las esquinas, mientras que la suma $\alpha + \beta$ es sensible tanto a los bordes como a las esquinas. Por lo

ISSN en trámite

tanto para resolver la matriz M, se utilizan las siguientes Ecuaciones.

$$tr(M) = \alpha + \beta = I_x^2(x,y) + I_y^2(x,y) \quad (20)$$

$$det(M) = \alpha\beta = I_x^2(x,y)I_y^2(x,y) - (I_xI_y(x,y))^2 \quad (21)$$

Utilizando las Ecuaciones 20 y 21, las respuestas de las esquinas pueden ser medidas utilizando la Ecuación 22

$$R(x,y) = det(M) - k\,tr^2(M) = \alpha\beta - k(\alpha+\beta)^2 \quad (22)$$

Donde k es un valor escalar escogido empíricamente desde un rango de $[0.04, 0.16]$.

5. RESULTADOS

Si se resuelven los eigenvalores en las imágenes filtradas por fase de la Figura 3 se obtiene tres nuevas imágenes que se muestran en la Figura 5. Se observa que la aplicación de Harris en las fases filtradas resulta en la detección de los bordes para cada fase, lo que en metalurgia se conoce como borde de grano. Esta delimitación permite a la vez obtener nuevas funciones de plano con la localización de cada objeto detectado.

Además, la representación del limite de grano de una microestructura, permite abrir un campo para la manipulación de imágenes metalográficas, mediante la utilización de herramientas como machine learning para la identificación de objetos y patrones, o la utilización de nuevas técnicas de visión computacional. Esto revolucionaria las técnicas actuales en cuanto al análisis de la deformación micrográficas, siendo que gran parte de ese análisis se realiza de manera manual, mediante el análisis manual de una persona.

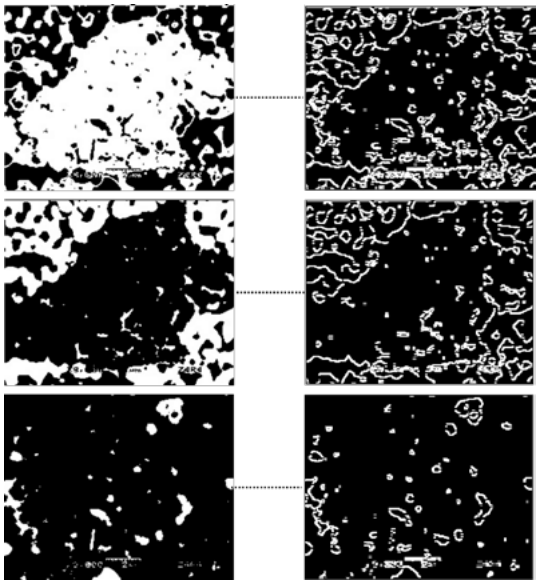


Fig. 5. Esquinas detectadas de las imágenes de fases filtradas

6. CONCLUSIONES

La conclusión principal es referida directamente a los resultados, los cuales muestran que el análisis del procesamiento de las imágenes micrograficas del material metálico propuesto para identificar el límite de grano en una aleación ternaria por medio del cálculo de los eigenvalores, el cual cumple con el propósito de revelar los constituyentes del material, como se maneja en Vázquez et al. (2021). Este procesamiento abre la posibilidad de que posteriormente se puedan obtener información tal como, la morfología, la distribución y el tamaño de los microconstituyentes.

Resultados importantes a resaltar son la Figura 2 y la Figura 5. Los cuales muestran las dos partes importantes de todo proceso, la entrada y la salida. La Figura 2 muestra que con datos óptimos se obtiene una salida igualmente optima como se ve en la Figura 5.

ACKNOWLEDGEMENTS

Este trabajo ha sido desarrollado como parte del programa beca nacional proporcionada por el CONACYT con número de apoyo 760955 en las instalaciones del Tec NM/Instituto Tecnológico de Morelia del programa Doctorado en Ciencias de la Ingeniería y al programa de Cátedras CONACYT con número 3219.

REFERENCES

Burger, W. and Burge, M. (2015). *Digital Image Processing An Algorithmic Introduction Using Java*, volume 19. Springer Nature, London, second edition. doi: 10.1007/978-1-4471-6684-9.

Dey, N., Nandi, P., Barman, N., Das, D., and Chakraborty, S. (2012). A Comparative Study between Moravec and Harris Corner Detection of Noisy Images Using Adaptive Wavelet Thresholding Technique. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(1), 599–606.

Gonzalez, R., Woods, R., and Eddins, S. (2009). *Digital image processing using MATLAB*, volume 16. Gatesmark Publishing, Natick, second edition. doi: 10.1007/s00147-003-0648-5.

Gueguen, L. and Pesaresi, M. (2011). Multi scale Harris corner detector based on Differential Morphological Decomposition. *Pattern Recognition Letters*, 32(14), 1714–1719. doi:10.1016/j.patrec.2011.07.021. URL `http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2011.07.021`.

Güneş, A., Kalkan, H., and Durmuş, E. (2016). Optimizing the color-to-grayscale conversion for image classification. *Signal, Image and Video Processing*, 10(5), 853–860. doi:10.1007/s11760-015-0828-7.

Harris, C. and Stephens, M. (2013). A Combined Corner and Edge Detector. In *Alvey Vision Conference*, 23.1–23.6. doi:10.5244/c.2.23.

Jain, R., Kasturi, R., and Schunck, B. (1995). *Machine Vision*. Computer science series. McGraw-Hill.

Malik, J., Dahiya, R., and Sainarayanan, G. (2011). Harris Operator Corner Detection using Sliding Window Method. *International Journal of Computer Applications*, 22(1), 28–37. doi:10.5120/2546-3489.

Mondragón, L., Gutiérrez, G., Garnica, P., and Vázquez, A. (2019). Características Microestructurales y

ISSN en trámite

Mecánicas de la Aleación Zinag, Inducidas por el Proceso de Extrusión en Canal Angular Constante (ECAP). *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*, 16, 181–189.

Thanki, R.M. and Kothari, A.M. (2018). *Digital image processing using SCILAB*. Springer Nature, 1 edition. doi:10.1007/978-3-319-89533-8.

Vázquez, A., Aguilera, I., Mondragón, L., and Prado, J. (2019). Análisis de dispersión de fases en aleación Zn-22 α Zona con Zona con. In *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Morelia 2019*, volume 11, 2980–2985. Academia Journals, Morelia, México, 1 edition.

Vázquez, A., Kaikina, E., Juárez, B., Aguilera, I.A., Prado, J., and Herrera, L. (2020a). Caracterización estocástica para materiales cristalinos por vectorización y mallas adaptativas de micrografías digitales. In *15° congreso nacional de ciencia tecnoloogía e innovación*, 1634–1640. Instituto de ciencia, tecnología e innovación, Morelia.

Vázquez, A., Kaikina, E.I., Aguilera, I., Juarez, B., Prado, J., Lázaro, P., and Herrera, L. (2020b). Revisión del estado del arte del aprendizaje automático en la reconstrucción y caracterización de materiales. In *Memorias del Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, volume 6, 82–91. Morelia, México, 1 edition.

Vázquez, A.V., Aguilera-Navarrete, I., and Juárez-Campos, B. (2021). Method for the simulation of deformation processes by processing metallographs. In *2021 Mexican International Conference on Computer Science (ENC)*, 1–8. doi:10.1109/ENC53357.2021.9534810.

ISSN en trámite

DevOps y su relación con la Ingeniería de Software: Un estudio bibliométrico

Luis Flores Orozco*. Blanca Dina Valenzuela Robles*.
*** René Santaolaya Salgado*. Mario Guillen Rodríguez ***
*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.
**(e-mail: m21ce011@cenidet.tecnm.mx, blanca.vr@cenidet.tecnm.mx, rene.ss@cenidet.tecnm.mx, mario.gr@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: En la última década ha cambiado la manera en que se lleva a cabo el proceso de desarrollo del software debido a la integración de los equipos de desarrollo y los administradores de sistemas mediante la adopción de prácticas de DevOps, tales como la integración continua, la entrega continua, el despliegue continuo y la automatización. Para comprender el proceso evolutivo en el tiempo de este campo de investigación y revisar las áreas emergentes se lleva a cabo un análisis bibliométrico. Este análisis permite cuantificar los indicadores de rendimiento mediante los principales autores, países y revistas; también permite realizar análisis de co-palabras y redes de coautoría. Así mismo, se obtienen mapas estratégicos para tres periodos estudiados que muestran la relación entre la Ingeniería de Software y DevOps, así como las tendencias actuales que indican que el cloud computing, las metodologías ágiles y la cultura DevOps, están cambiando la forma de trabajar y pensar en las empresas de desarrollo de software.

Keywords: DevOps, Ingeniería de Software, Bibliometría, Análisis de rendimiento, Mapas estratégicos, SciMAT, VosViewer.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente estudio es mostrar una visión general del desarrollo de software mediante la adopción de prácticas de DevOps; así como comprender su proceso evolutivo y revisar las áreas emergentes de investigación en dicha área. Este estudio es llevado a cabo mediante un análisis bibliométrico que permite resumir grandes cantidades de datos con base en la producción global de la literatura científica (Donthu et al., 2021).

En (Osareh, 1996) se describe la bibliometría como la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos en el estudio del uso de los documentos y patrones de publicación. Los indicadores bibliométricos son instrumentos para medir las producciones científicas y permiten analizar el impacto que causa un trabajo científico, los resultados de este análisis son datos estadísticos deducidos de dichas publicaciones científicas y que tienen relevancia tanto como para conocer el estado actual, así como para para la generación de nuevas investigaciones sobre el tema (Milán-García et al., 2021). Para lograr el objetivo la metodología implementada en este estudio es mediante un análisis de desempeño y un enfoque de mapeo científico. Este análisis permite recuperar información importante sobre la temática de DevOps a través de la construcción de mapas científicos y redes temáticas y su relación con otras áreas de Ingeniería de Software, así mismo, permitirá mostrar tendencias que podrían ser la base para futuros desarrollos en este campo. (Cobo et al., 2011) El término DevOps es una combinación de Desarrollo y Operaciones (Erich et al., 2014); es una nueva forma de pensar, un paradigma, en el dominio de la Ingeniería de Software (Jabbari et al., 2016) además de esto, promueve la importancia de los equipos pequeños como lo hacen las metodologías ágiles ya que se puede aplicar tanto para microservicios como para aplicaciones monolíticas (Jha and Khan, 2018).
Otras definiciones se han acuñado respecto al término, como en (Leite et al., 2020) quienes definen DevOps como *"un esfuerzo colaborativo y multidisciplinario dentro de una organización para automatizar la entrega continua de nuevas versiones de software, garantizando al mismo tiempo su exactitud y conformidad*".

DevOps surge como un enfoque que fusiona los roles tradicionales del software cuya meta principal es mejorar la comunicación y la frecuencia de implementación de tal manera que se mantenga la calidad del software.

En el año 2021 la IEEE publica el estándar IEEE-2075-2021 (*IEEE Standard for DevOps*, n.d.), cuyo propósito es especificar prácticas para que entre operaciones y desarrollo haya colaboración y comunicación mutua, de tal manera que se entregue software de calidad al usuario final, y además permite mejorar los procesos del ciclo de vida. En este documento se define DevOps como "*Conjunto de principios y prácticas que permiten una mejor comunicación y colaboración entre las partes interesadas con el fin de especificar, desarrollar y operar productos y servicios de software y sistemas, así como mejoras continuas en todos los aspectos del ciclo de vida*".

2. METODOLOGÍA

2.1 Consulta a bases de datos

Se consultaron las bases de datos de Scopus, IEEE y Web of Science, ya que estas son las más grandes bases de datos de referencias bibliográficas de resúmenes y citas de publicaciones científicas periódicas. En la Tabla 1 se muestra el tipo de publicación y la cantidad de documentos extraídos de cada una de ellas.

ISSN en trámite

Tabla 1. Distribución de documentos por base de datos.

Tipo de publicación	Scopus	Web of Science	IEEE
Artículos (Article and article in press)	247	465	91
Artículos de Congreso (Conference Paper)	904	1456	368
Revisión (Review)	29	63	-
Capítulos de libros y libros (Books and Book chapter)	23	13	1
Total, documentos	1203	1997	460

2.2 Criterios de búsqueda.

Los criterios de búsqueda utilizados para la recuperación de los documentos principales se seleccionaron con base en las principales prácticas actuales en el desarrollo de software bajo el enfoque DevOps. En la Tabla 2 se muestra una lista de la palabra clave DevOps y aquellas relacionadas con el tema de investigación.

Tabla 2. Palabras clave para los criterios de búsqueda.

Cont_Deployment = ["Continuous Deployment"]
dev_agileM = ['Devops' and 'Agile']
dev_Adoption = ['DevOps' and 'Adoption']
DevOps_CS = ['DevOps' and 'Computer Science']
DevOps_SE = ['DevOps' and' Software Engineering']
DS_Academy = ["Data Science" and "Academy"]
Dev_Obs = ["DevOps" and "Observability"]
Dev_Opt_Pers = ["DevOps" and "Operations" and "Developers"]
Cont_Delivery = ["Continuous Delivery"]
Cont_Integration = ["Continuous Integration"]
DevSecOps = ["DevSecOps"]

2.3 Herramientas

Existen diversas herramientas que contienen potentes funciones de procesamiento, algunas permiten la generación de una gran cantidad de redes bibliométricas y otras en cambio, solo permiten extraer un tipo de red. Para este análisis se utilizó la herramienta SciMAT (Cobo et al., 2012), una herramienta open source que ejecuta análisis bibliométricos completos y cuya funcionalidad permite construir redes bibliométricas a través del preprocesamiento de los datos y mapas de ciencia basados en citas, esto permite obtener resultados visuales de los mapas generados[1].

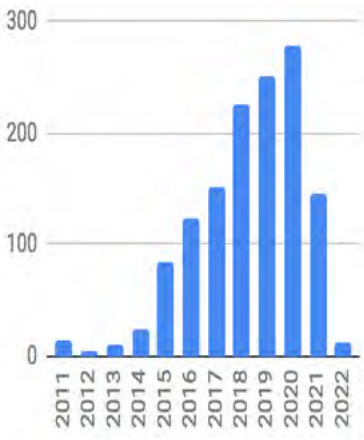
Otra manera de crear y visualizar redes bibliométricas, es mediante la herramienta VOSviewer, en este análisis se usó la versión 1.6.18. Esta herramienta permite crear y visualizar redes de co-ocurrencia de términos importantes extraídos del corpus de la literatura científica entre otras funcionalidades. En estas redes pueden incluir, por ejemplo, revistas individuales, investigadores o publicaciones, y pueden construirse sobre la base de citas, bibliografías o informes de coautoría[2].

2.4 Selección, carga y limpieza de datos.

Se realizó la unificación de los tres conjuntos de datos (WoS, Scopus y IEEE) y se cargaron en la herramienta SciMAT; se procedió a la limpieza de datos de los documentos en la herramienta SciMAT, la cual detecta elementos duplicados y mal escritos; de un total de 3660 documentos que fueron extraídos de las bases de datos mencionadas, fueron eliminados 2331 documentos, entre ellos los documentos review (reseña de libros), las editoriales o las cartas al editor. En la Tabla 3, se muestran los 1313 documentos restantes clasificados como producción científica anual, en el periodo comprendido de 2011 a 2022.

Aunque los primeros términos de DevOps surgen en el año 2008, no es, sino hasta el año 2011 que se publica sobre la administración de sistemas ágiles y la infraestructura a gran escala en la nube, estos dos factores dan inicio a lo que hoy es DevOps (Humble and Molesky, 2011), además, se describen los beneficios de llevar el enfoque ágil a las operaciones y así garantizar que el negocio sea realmente ágil (Gohil et al., 2011), uno de los objetivos del enfoque DevOps. En los primeros años del surgimiento del enfoque DevOps fueron pocas las publicaciones científicas debido a lo novedoso del tema; comenzando en el año 2015 a incrementar el número de manera significativa, siendo el año 2020 donde hubo mayor número de contribuciones académicas (278); se podría deducir que la disminución de publicaciones en el año 2021 fue debido a la pandemia sobre el COVID 19 y que varios autores enfocaron sus temas hacia dicha problemática.

Tabla 3. Producción científica anual (2011-2022)

Gráfica	Año	Publicaciones
	2011	14
	2012	5
	2013	10
	2014	23
	2015	84
	2016	124
	2017	153
	2018	226
	2019	252
	2020	278
	2021	146
	2022	12

[1] https://sci2s.ugr.es/scimat/

[2] https://www.vosviewer.com/

ISSN en trámite

3. CREACIÓN DE MAPAS CIENTÍFICOS Y REDES TEMÁTICAS

Mediante la exploración de las 1313 publicaciones científicas y a partir del año 2011 hasta principios del año 2022, se realiza un análisis de rendimiento, co-palabras (co-words), redes de coautoría, análisis y evolución temática sobre el campo de estudio DevOps.

3.1 Análisis de rendimiento

En este análisis se presentan algunos componentes de la investigación, como autores, instituciones, países y revistas en el campo de DevOps. Para determinar esta contribución se utilizaron algunas medidas para el análisis del rendimiento como el número de publicaciones y de citas por año, así como las citas por publicación y el índice h (Donthu et al., 2021). En la Tabla 4 se muestra el análisis de rendimiento sobre el número de artículos publicados, el número de citas, el promedio de citas por publicación y el índice h para medir el rendimiento teniendo en cuenta los componentes de investigación. Así mismo, se observa que el número de citas del 2020 a 2022 son menores debido a que las publicaciones más antiguas tienden a tener más citas que las publicaciones más recientes porque han tenido más tiempo para ser citadas por trabajos posteriores

Tabla 4. Documentos publicados e impacto por año

Año de publicación	No. artículos publicados	No. total, de citas	Promedio de citas por publicación	Índice h
2011	14	150	10.71	6
2012	5	77	15.4	8
2013	10	397	39.10	2
2014	23	423	18.39	12
2015	84	1173	13.96	15
2016	124	1736	14.0	23
2017	153	1574	10.29	19
2018	226	1059	4.69	14
2019	252	666	2.64	13
2020	278	131	0.47	5
2021	146	3	0.02	1
2022	12	0	0	0

Los tres artículos más citados fueron (Boettiger, 2015; Balalaie et al., 2016; Fitzgerald and Stol, 2017) con 379, 279 y 225 citas respectivamente. En estos artículos se plantea el énfasis que la comunidad de desarrollo de software hace sobre DevOps y en cómo su adopción facilita en gran medida la migración de tecnologías tales como los microservicios, así mismo, se hace énfasis en la importancia de la continuidad entre la integración, el desarrollo del software y su despliegue operativo.

3.2 Redes de coautoría

En Fig.1 se muestra la red de coautoría entre los diferentes académicos y su colaboración en el área de DevOps y las diferentes áreas de la Ingeniería de Software, estableciendo un vínculo profesional entre la comunidad científica y académica. En esta red los nodos son los científicos y dos científicos están vinculados en coautoría, si escribieron un trabajo juntos. Dentro de este conjunto se observan los distintos clústeres o componentes y las redes sociales de los autores y sus coautores y colaboradores.

Se identificaron 405 clústeres diferentes de cocitación entre los autores y la cercanía entre ellos hace referencia al grado de similitud entre ellos. Mikkonet, T, Wettinger, J, Leymann, F, Tamburry Da, Perera, Van Hoorn, Zhu Im, Kim J. Tavierner W. lideran cada clúster teniendo un promedio de 100 citas.

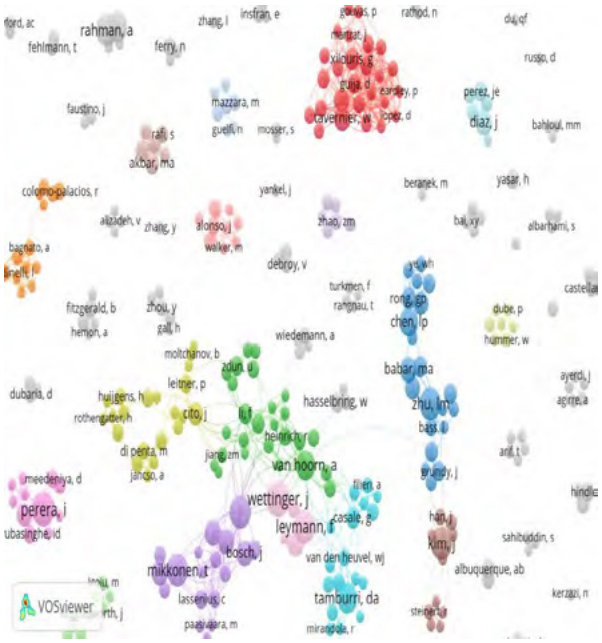


Fig.1. Mapa de coautoría de autores centrado en la investigación sobre DevOps y su relación con las diferentes áreas de Ingeniería de Software.

De la misma manera, se incluyen los atributos de autor asociados, como las instituciones u organizaciones afiliados, tal como se muestra en Fig.2 la institución más influyente dentro de la red de coautoría es Technology y System, con una mayor correlación con otras instituciones como IBM, Carnegie Mellon University y Siemens Ag.

ISSN en trámite

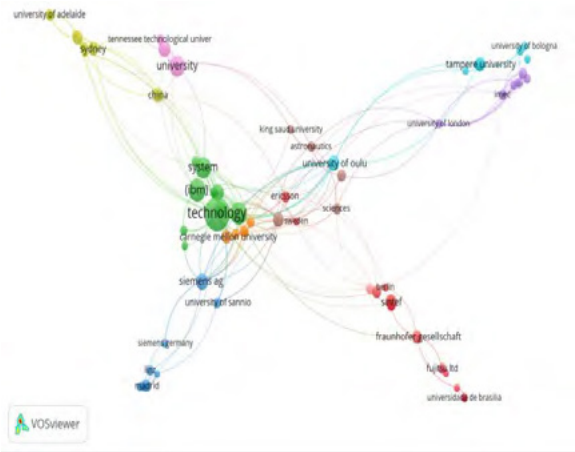


Fig.2. Mapa de coautoría de organizaciones centrado en la investigación sobre DevOps y su relación con las diferentes áreas de Ingeniería de Software.

Las redes de colaboración científica basados en el nivel de coautoría se pueden clasificar también por países de manera internacional o nacional, en Fig.3 se puede observar como Estados Unidos y Alemania lideran la producción científica en el área analizada, seguidos de Italia, China e India. En este análisis resultaron 46 países colaboradores; entre los grupos más grandes, como ya se mencionó anteriormente, está Estados Unidos quien colabora con 13 países, Alemania que colabora con 9 países, China, India e Italia colaboran en promedio con 7 países

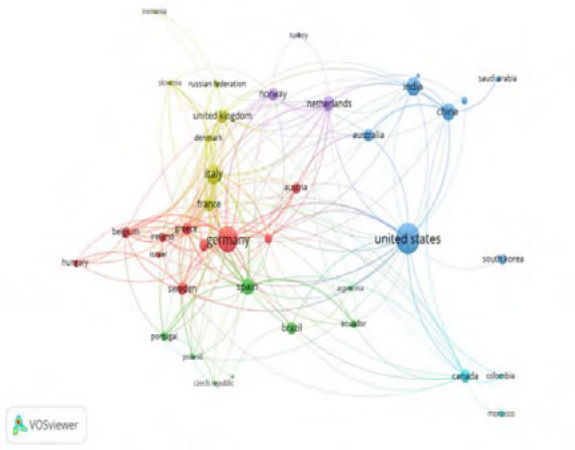


Fig.3. Mapa de coautoría de países centrado en la investigación sobre DevOps.

Por último, para el análisis de rendimiento se visualiza en Fig.4 las 28 revistas y publicaciones científicas que más citan el enfoque DevOps, de estas se destacan las revistas de Lecture Notes in Computer Science con 334 citas, IEEE Software con 329 citas, y ACM con 196.

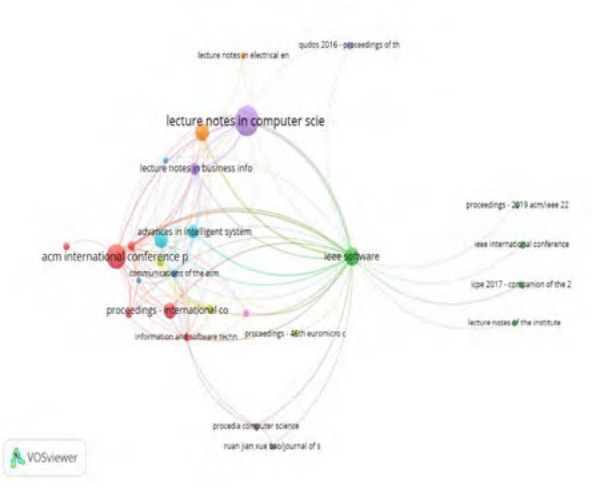


Fig.4. Red de tipos de publicación centrada en la investigación sobre DevOps.

En Fig.5 se muestra el análisis de las 65 instituciones y universidades más citadas, de un total de 1827 de las cuales destacan: Paderborn University, Alemania, Institute of Architecture of Application Systems (iaas), University of Stuttgart, Alemania y Tampere University of Technology, Tampere, Finlandia

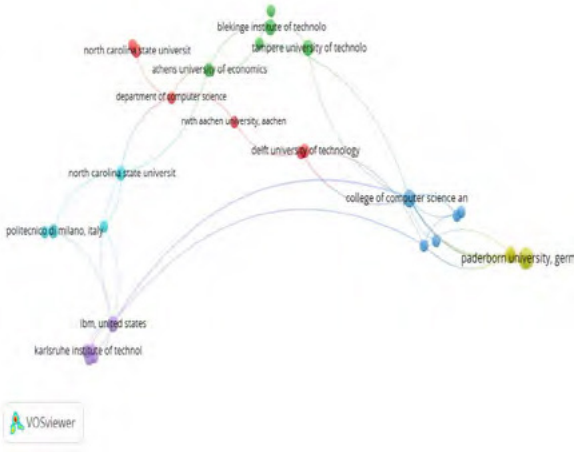


Fig.5. Red de instituciones centrada en la investigación sobre DevOps.

4. ANÁLISIS TEMÁTICO

En Fig.6 se visualiza la red de co-palabras, donde cada nodo de la red representa una palabra clave, en la que el tamaño del nodo indica la ocurrencia de la palabra clave, por ejemplo, la palabra clave DevOps aparece 685 veces, software design 297 veces y software engineering 203 veces, siendo estas las de mayor ocurrencia en la red. El enlace entre los nodos representa

ISSN en trámite

la co-ocurrencia entre las palabras clave, es decir las palabras clave que co-ocurren u ocurren juntas, por ejemplo, software engineering y DevOps coinciden o aparecen juntas 140 veces, pero ambas tienen una red de ocurrencia conjunta con otras palabras clave.

La cobertura de temas sobre DevOps es realmente amplia, se pueden observar 11 grupos de los cuales: software design, software engineering, DevOps, cloud computing, automatization, life cycle son los grupos predominantes o más influyentes en el conjunto de datos

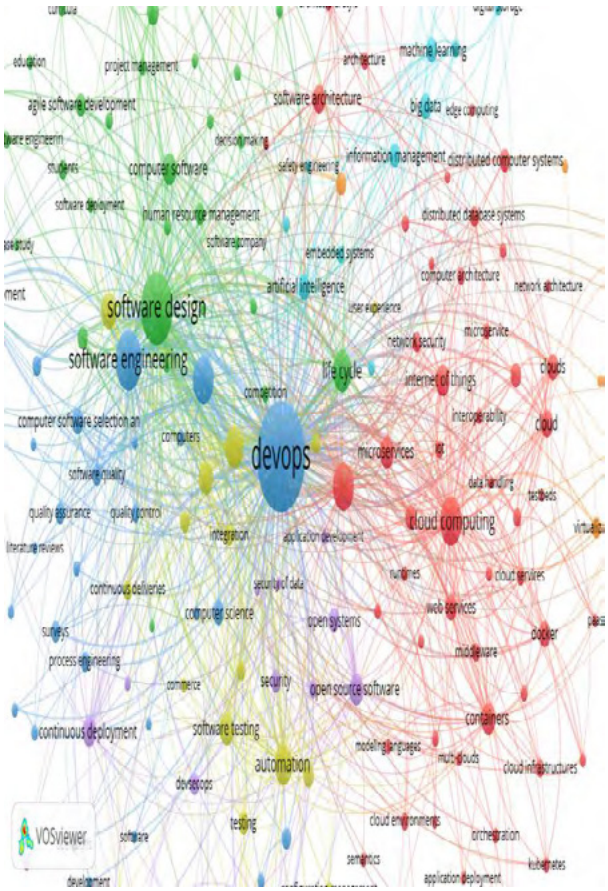


Fig.6. Red de co-palabras centrado en la investigación sobre DevOps y su relación con las diferentes áreas de Ingeniería de Software.

4.1 Evolución temática de DevOps

Usando SciMAT se analizó la evolución temática de DevOps y su relación con la Ingeniería de Software durante el periodo 2011 a 2022 en función de las palabras clave DevOps e Ingeniería de Software como se muestra en Fig.7 Los círculos están divididos en tres periodos (2011-2014) (2015-2018) (2019-2022) y representan cada periodo de tiempo y el número dentro de ellos es el total de palabras clave asociadas al periodo. La flecha horizontal representa el número de palabras clave compartidas por ambos puntos y, entre paréntesis, se muestra el índice de similitud entre ellos. La flecha entrante representa la cantidad de palabras clave nuevas del período y la flecha de salida representa las palabras clave que están presentes en el primer período, pero no en el segundo período.

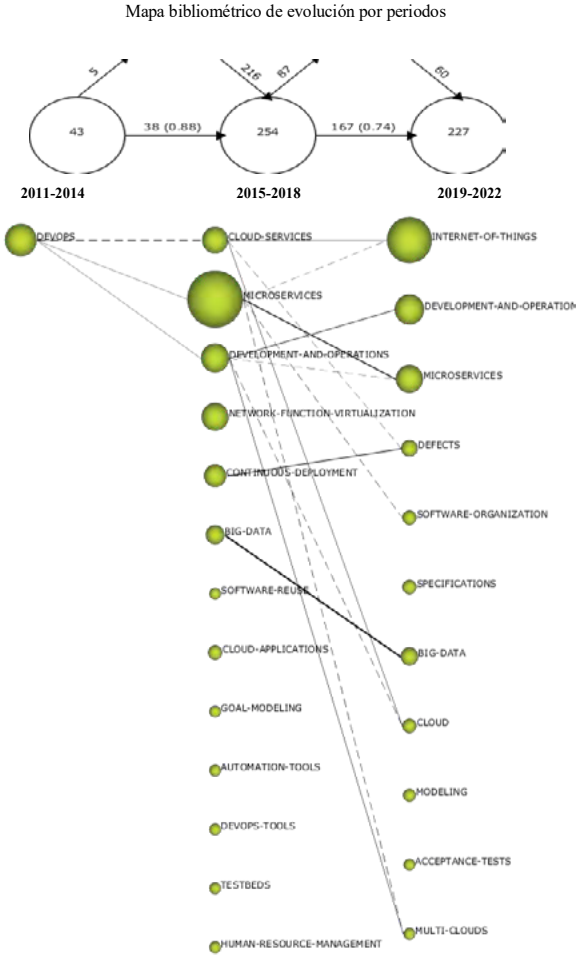


Fig.7. Mapa de evolución de DevOps y las áreas temáticas relacionadas con Ingeniería de Software (2011-2022)

Periodo (2011-2014): Durante este periodo 19 documentos aparecen con la palabra clave de DevOps, que dieron origen al concepto. En Fig.8., se muestra el mapa estratégico donde se observa el tema DevOps como tema motor con alta densidad y alta centralidad, ya que representa la importancia del tema en el desarrollo global del campo científico. Así mismo, las palabras clave que tienen una alta cohesión con el tema son Development and Operations, Cloud, Web Services y Deployment.

ISSN en trámite

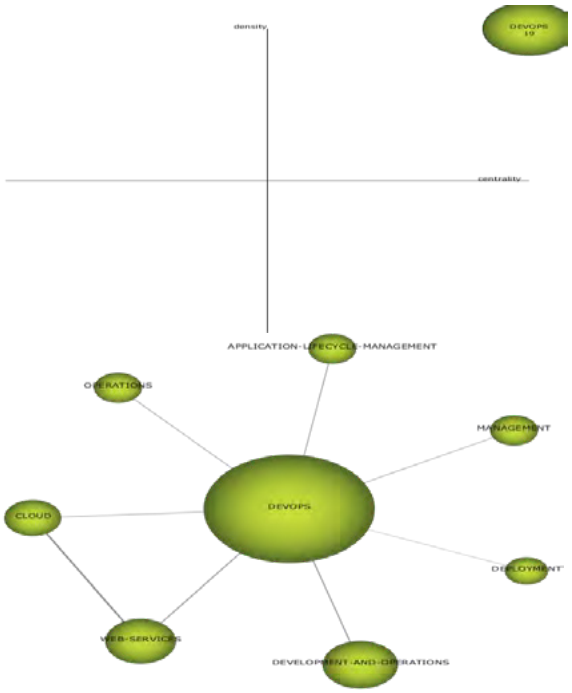


Fig.8. Mapa estratégico período 2011-2014 y temas relacionados con DevOps

Periodo (2015-2018): Durante este periodo, 78 son los documentos publicados, de los cuáles: Development and Operations, Microservices, Big Data, Continuous Deployment y Cloud Aplications. Aparecen como temas básicos o transversales y poco desarrollados debido a su reciente aparición, pero son temas importantes para el campo científico, ver Fig. 9 y 10.

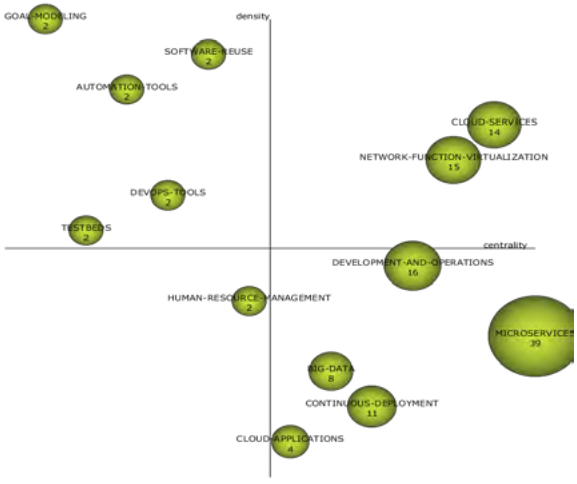


Fig.9. Mapa estratégico período 2015-2018



Fig.10. Temas relacionados con DevOps período 2015-2018

Periodo (2019-2022): durante este periodo 73 son los documentos de investigación que están relacionados con el área de DevOps, de los cuales Internet of Things, Big Data, Microservices, Cloud y Development and Operations son temas clave para el crecimiento del enfoque DevOps. En este periodo los temas más desarrollados internamente, pero aislados del resto de los temas tienen una importancia marginal ya que son temas muy especializados, estos son Modeling, Acceptance Tests, Software Organization, Specifications y Multi Clouds como se muestra en Fig.11.

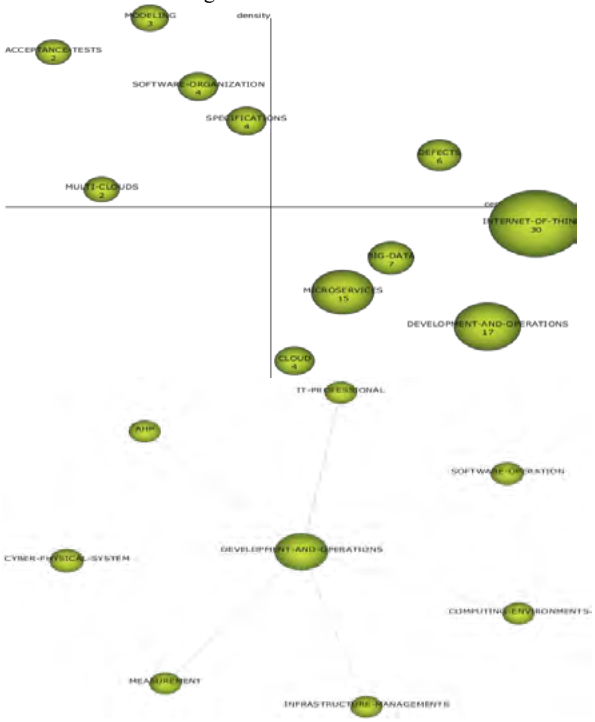


Fig.11. Mapa estratégico período 2019-2022 y temas relacionados con DevOps

ISSN en trámite

5. CONCLUSIONES

Con base en las 1313 publicaciones obtenidas de las bases de datos Scopus, IEEE y Web of Science, se realiza un estudio bibliométrico donde se puede observar que el enfoque DevOps ha sido un área de estudio muy desarrollada en la última década con un incremento considerable de publicaciones en los años 2018, 2019 y 2020. El máximo número de documentos con el tema DevOps publicados fueron 278 en el año 2020, lo que muestra el gran interés de los investigadores por la correcta adopción de las prácticas de DevOps en la industria del desarrollo de software basándose en las prácticas ágiles y de reducción de costes. Lecture Notes in Computer Science, IEEE y ACM son consideradas las más grandes series de actas de conferencias en ciencias de la computación, y en las que se ha publicado el mayor número de artículos sobre el área temática analizada (104, 40, 69 respectivamente). Aproximadamente el 88% de las publicaciones son en inglés y Estados Unidos es el país con el mayor número de artículos publicados, seguido de Alemania, Italia, India y China. Wettinger, Ley, Mann, Mikkonen, Tamburri, Perera, Van Hoorn y Zhu son los autores que lideran cada uno de los clústeres del conjunto de datos por el número de artículos publicados.

Este estudio contribuye al desarrollo de la estructura de conocimiento del enfoque DevOps y su relación con la Ingeniería de Software a través de las principales áreas temáticas como integración continua, entrega continua, despliegue continuo, automatización, enfoques ágiles, microservicios e infraestructura en la nube, como la base de dicho enfoque. En las redes temáticas se muestra también la aplicación o adopción de las prácticas y actividades de DevOps en las áreas de Inteligencia Artificial, Internet de las Cosas, Big Data y Machine Learning.

Las tendencias actuales indican que el cloud computing, las metodologías ágiles y la cultura DevOps, están cambiando la forma de trabajar y pensar en las empresas de desarrollo de software por lo que sigue siendo un área de oportunidad para la investigación. Así mismo, DevSecOps está generando bastante interés ya que su adopción implica un gran desafío.

REFERENCIAS

Balalaie, A., Heydarnoori, A., Jamshidi, P., 2016. Microservices Architecture Enables DevOps: Migration to a Cloud-Native Architecture. IEEE Softw. 33, 42–52. https://doi.org/10.1109/MS.2016.64

Balalaie, A., Heydarnoori, A., Jamshidi, P., n.d. Microservices Architecture Enables DevOps: An Experience Report on Migration to a Cloud-Native Architecture 13.

Boettiger, C., 2015. An introduction to Docker for reproducible research. SIGOPS Oper. Syst. Rev. 49, 71–79. https://doi.org/10.1145/2723872.2723882

Cobo, M.J., López-Herrera, A.G., Herrera-Viedma, E., Herrera, F., 2012. SciMAT: A new science mapping analysis software tool. J Am Soc Inf Sci Tec 63, 1609–1630. https://doi.org/10.1002/asi.22688

Cobo, M.J., López-Herrera, A.G., Herrera-Viedma, E., Herrera, F., 2011. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. Journal of Informetrics 5, 146–166. https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., Lim, W.M., 2021. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research 133, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Erich, F., Amrit, C., Daneva, M., 2014. Cooperation between information system development and operations: a literature review, in: Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement. pp. 1–1.

Fitzgerald, B., Stol, K.-J., 2017. Continuous software engineering: A roadmap and agenda. Journal of Systems and Software 123, 176–189. https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.06.063

Gohil, K., Alapati, N., Joglekar, S., 2011. Towards behavior driven operations (BDOps), in: 3rd International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom 2011). Presented at the 3rd International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom 2011), IET, Bangalore, India, pp. 262–264. https://doi.org/10.1049/ic.2011.0095

Humble, J., Molesky, J., 2011. Why enterprises must adopt devops to enable continuous delivery. Cutter IT Journal 24, 6.

IEEE Standard for DevOps:Building Reliable and Secure Systems Including Application Build, Package, and Deployment, n.d. . IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9415476

Jabbari, R., bin Ali, N., Petersen, K., Tanveer, B., 2016. What is DevOps?: A Systematic Mapping Study on Definitions and Practices, in: Proceedings of the Scientific Workshop Proceedings of XP2016. Presented at the XP '16 Workshops: Scientific Workshop Proceedings of XP2016, ACM, Edinburgh Scotland UK, pp. 1–11. https://doi.org/10.1145/2962695.2962707

Jha, P., Khan, R., 2018. A Review Paper on DevOps: Beginning and More To Know. IJCA 180, 16–20. https://doi.org/10.5120/ijca2018917253

Leite, L., Rocha, C., Kon, F., Milojicic, D., Meirelles, P., 2020. A Survey of DevOps Concepts and Challenges. ACM Comput. Surv. 52, 1–35. https://doi.org/10.1145/3359981

Milán-García, J., Caparrós-Martínez, J.L., Rueda-López, N., de Pablo Valenciano, J., 2021. Climate change-induced migration: a bibliometric review. Global Health 17, 74. https://doi.org/10.1186/s12992-021-00722-3

Osareh, F., 1996. Bibliometrics, citation analysis and co-citation analysis: A review of literature I.

ISSN en trámite

Desarrollo Experimental para la Detección de Caídas en Adultos Mayores Utilizando el Método Basado en Umbrales

Angel Israel Daza-Castillo, Manuel Erazo-Valadez, Javier Ortiz-Hernández, Juan Antonio Miguel-Ruiz, María Yasmín Hernández Pérez, Alicia Martínez-Rebollar, Hugo Estrada-Esquivel
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico/CENIDET, Cuernavaca, México
(m21ce007, m20ce059, javier.oh, m20ce065, yasmin.hp, alicia.mr, hugo.ee)@cenidet.tecnm.mx

Resumen: Aproximadamente el 30% de los adultos mayores sufren una caída por lo menos una vez al año y el 50% de esa cantidad sufrirá dos caídas. Asimismo, la cantidad de caídas que puede sufrir un adulto mayor se eleva al aumentar la edad. Las caídas tienen un alto índice de morbimortalidad y se consideran un problema importante de salud pública. Se estima que un 7% de las visitas de los adultos mayores al hospital son consecuencia de alguna caída y de estas el 40% necesitan de una hospitalización. En este artículo se presentan los resultados de las pruebas experimentales en ambiente controlado de un prototipo para la detección de caídas en adultos mayores, donde la finalidad es la determinación precisa de los umbrales del método de detección de caídas basado en umbrales.

Palabras clave: Caídas de adultos mayores, Definición de umbrales para la detección de caídas, Adultos mayores

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define una caída como un acontecimiento involuntario que afecta a una persona que le provoca perder el equilibrio y golpear el suelo u otra superficie que lo detenga [1].

"El envejecimiento acelerado de la población ha provocado que se genere un nuevo problema de salud pública: las caídas de personas de la tercera edad" [2]. Se estima que durante un año suceden aproximadamente 37.3 millones de caídas por adultos mayores, provocando lesiones graves en las personas que las sufrieron [3].

Estudios epidemiológicos han arrojado como resultado que una de cada tres personas mayores de 65 años, sufre una caída al año y la mitad de estas personas sufre más de una [4]. Las muertes como resultado de alguna caída de adultos mayores con edad de 65 años y mayores representan tres cuartas partes de las muertes por caída en los Estados Unidos [5].

La incidencia y la gravedad de los daños provocados por las caídas aumentan de acuerdo con la edad, ya que con la edad también se ve afectado el equilibrio y la reacción de las personas de la tercera edad [6]. Las consecuencias provocadas por las caídas pueden ser físicas y psicológicas. Las consecuencias físicas más comunes son inflamaciones provocadas por el golpe y las fracturas se presentan en un 6% del total de las caídas. Mientras que las consecuencias psicológicas más comunes son la pérdida de la confianza en sí mismo y el miedo o ansiedad a sufrir de nuevo una caída [4].

Las personas de 65 años y más, son propensas a sufrir una mayor cantidad de caídas. Por cuestiones de la edad pueden presentar diversas enfermedades crónicas y/o degenerativas como lo son los problemas cardiovasculares, trastornos del sistema nervioso y la osteoporosis las cuales pueden influir en la dificultad para caminar, pérdida de equilibrio y movimiento [5], [7].

Varios estudios han demostrado que personas que consumen tres medicamentos o más, tienen mayor probabilidad de sufrir una caída [3], [4]. Los medicamentos que elevan la probabilidad de sufrir una caída en las personas de la tercera edad son los siguientes: drogas psicotrópicas, sedantes, hipnóticos, antidepresivos, benzodiacepinas y neurolépticos [5], [7].

Se han detectado una gran variedad de factores extrínsecos e intrínsecos que se han asociado a las caídas que sufre este grupo de la población. Los factores extrínsecos más comunes son los relacionados con el ambiente del hogar y los intrínsecos detectados son: las discapacidades, enfermedades crónicas agudizadas, caídas previas, cambios del cuerpo provocados por la edad y la medicación múltiple. La presencia de dos o más de estos factores está relacionado con la probabilidad de que ocurra una caída [8].

En México residen 15.4 millones de personas con una edad de 60 años o mayores, de las cuales 7.4 millones viven solas. El 41.4% son económicamente activos, mientras que el 69.4 sufre de alguna discapacidad [9].

2. EXPERIMENTACIÓN

2.1 Objetivo de la experimentación

El objetivo de realizar la experimentación es obtener datos de caídas y poner a prueba el algoritmo de detección de caídas basado en umbrales que se implementó en un prototipo de aplicación móvil para realizar la experimentación.

ISSN en trámite

2.2 Selección de candidatos

Para esta experimentación se seleccionaron diez participantes masculinos. Se buscó que los voluntarios teuvieran ciertas diferencias en características como el peso y la altura. Lo anterior con el objetivo de verificar si se producen diferencias en los resultados de la detección de las caídas. Antes de realizar las actividades de la experimentación se aplicó un custionario a los voluntarios para verificar si padecen de alguna enfermedad o algún problema físico que les impida ser parte de la experimentación. Además, se les entregó un documento de consentimiento informado para ser leído y firmado por cada uno de ellos. En dicho documento se les hace de su conocimiento que los datos generados serán utilizados solo para este estudio y su información personal no será difundida.

Las características que se consideraron de cada uno de los voluntarios son: edad, altura y el peso en kilogramos. La Tabla 1 muestra las características de cada uno de los voluntarios.

Tabla 1: Características de los sujetos de prueba

Sujeto de pruebas	Edad	Altura (m)	Peso (Kg)
1	23	1.74	109.90
2	30	1.70	93.85
3	23	1.66	79.30
4	26	1.85	117.20
5	19	1.75	94.70
6	19	1.84	81.40
7	19	1.72	78.20
8	61	1.72	68.10
9	26	1.69	77.50
10	25	1.70	63.25

2.3 Realización de la experimentación

La experimentación se desarrolló en un ambiente controlado con los diez sujetos de pruebas, todos los sujetos fueron hombres. Se utilizó una colchoneta para evitar lesiones.

Se realizaron las actividades de caminar, trotar, caída frontal con el cuerpo estático y caída frontal con caminata. La caminata se realizó en una velocidad cómoda para el sujeto, durante diez minutos (Fig. 1).



Fig. 1. Caminando

El trote se realizó de igual manera con una velocidad cómoda para el sujeto por un tiempo de 3 minutos (Fig. 2.)



Fig. 2. Trotando

La caída frontal con el cuerpo estático dejando se caer en la colchoneta, con un tiempo de reposo de un minuto, Fig.3, 4, 5 y 6. La caída frontal con caminata de un minuto y dejándose caer en el colchón con un tiempo de reposo de 1 minuto.



Fig. 3. Caída frontal cuerpo estático precipitación

ISSN en trámite



Fig. 4.Caída frontal cuerpo estático caída libre



Fig. 5.Caída frontal cuerpo estático impacto



Fig. 6.Caída frontal cuerpo estático reposo

El dispositivo utilizado fue el Arduino nano 33 ble que se colocó a la altura de la cintura del sujeto, en una protoboard pegada con cinta velcro al cuerpo y una power bank para su alimentación, Figura 7.

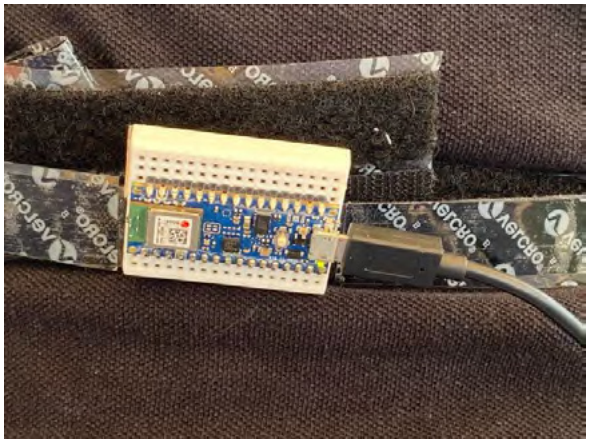


Fig. 7. Dispositivo para detección de caídas.

3. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

3.1 Adquisición de los datos

La adquisición de los datos de las aceleraciones se obtuvo mediante un prototipo de aplicación desarrollado en React Native. La aplicación obtiene los datos del dispositivo que portan los candidatos y los almacena en una base de datos para que posteriormente se pueda acceder mediante la generación de archivos CSV.

Los archivos CSV contienen los datos de la aceleración obtenida por cada uno de los ejes del acelerómetro, la fecha en la que se realizó la experimentación y el nombre de la prueba a la que pertenecen los datos. El objetivo principal de poder almacenar estos archivos es para que puedan ser consultados por un tercero en forma de datasets.

La Figura 8 muestra la forma en que se comunica el sensor con el teléfono inteligente utilizando Bluetooth Low Energy (BLE).

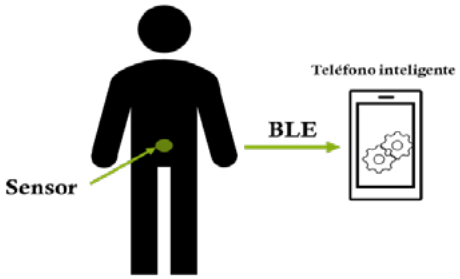


Fig. 8. Comunicación del sensor con el teléfono inteligente utilizando el BLE.

3.2 Procesamiento de datos

ISSN en trámite

El procesamiento se realizó mediante el algoritmo de umbrales que toma en cuenta tres fases las cuales son: caída libre, impacto y el reposo. La Figura 9 muestra el pre-procesamiento requerido de los datos previamente a la detección de la caída.

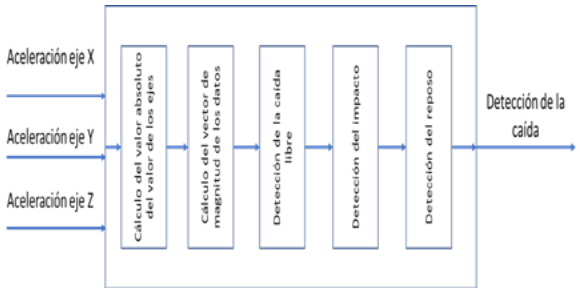


Fig. 9. Pre-procesamiento de los datos.

Al llegar los datos recuperados a la aplicación pasan por distintas fases para poder realizar la detección de la caída.

• Cálculo del valor absoluto de los ejes: Este cálculo se realiza para evitar valores negativos en las aceleraciones de los ejes, para evitar que la orientación del dispositivo de monitoreo afecte la detección de cada una de las fases.

• Cálculo del vector de magnitud: Para el cálculo del vector de magnitud se utiliza la ecuación 1 donde se contemplan los tres ejes del acelerómetro.

• Detección de las fases de la caída: Los datos del vector de magnitud se utilizan para detectar cada una de las tres fases de la caída, al detectarse todas las fases el algoritmo mandaría la alerta de que se detectó una caída.

4. RESULTADOS

Se realizaron dos pruebas con diferentes umbrales en el mismo lugar, con los mismos sujetos y en diferentes fechas.

4.1 Primeras pruebas

Las primeras pruebas fueron en un lugar cerrado de 4x6 metros. Se realizaron las pruebas de caminata, trote, caída frontal con el cuerpo estático y caída frontal con caminata. Se realizaron con sujetos con diferentes alturas y pesos.

Se utilizaron los umbrales encontrados en [13], en el cual se tiene como umbral de caída libre de 0.6 g, de impacto 1.5 g y del reposo en un rango de -0.5 g y 0.5 g. Un 1 g es igual a la aceleración de la gravedad de 9.81 m/s^2.

Se realizaron 12 pruebas tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Fase uno de pruebas

Actividad	Se detectó caída	No se detectó caída
Caminata	1	2
Trote	2	1
Caída frontal con el cuerpo estático	3	0
Caída frontal con caminata	3	0

En ella se observa que en las pruebas de caminata y trote detectan caídas, las cuales son consideradas falsos positivos. Los falsos positivos presentan cuando se realiza una actividad de la vida diaria y el algoritmo la detecta como una caída.

4.2 Segundas pruebas

Este segundo paquete de pruebas se realizó debido a la detección de falsos positivos en la caminata y en el trote en el primer paquete de pruebas. Por esta razón se tomó la decisión de analizar con mayor cuidado la determinación de los umbrales.

En la **Figura 10** se muestra la grafica de una prueba de caída. En ella se observa la fase da caída libre en el recuadro rojo, el impacto en el recuadro morado y en el recuadro verde representa el reposo.

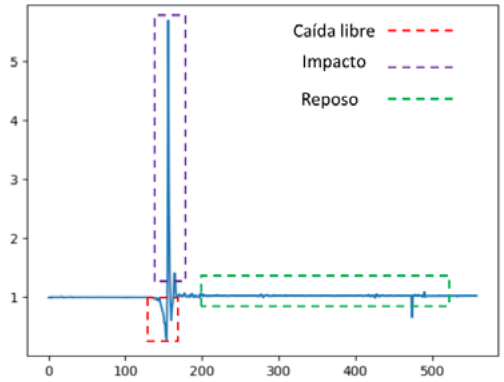


Fig. 10. Gráfica de caída frontal con el cuerpo estático.

Se analizaron los datos en los que se detecta cada fase de la caída, y se obtuvieron los mínimos y máximos de caída libre e impacto, con ellos se calculó el primer, segundo cuartil y la mediana. Los mínimos se promediaron para obtener el umbral de caída libre que es 0.31611675 y máximo para el impacto que es 4.719323 (Tabla 3).

ISSN en trámite

Tabla 3. Definición de umbrales caída libre

Sujeto de pruebas	Fecha prueba	Máximo	Mínimo	Cuartil 1	Cuartil 3	Mediana
1	15/03/2022	5.090097	0.285228	0.993474	0.998743	0.996044
2	15/03/2022	4.471511	0.367489	0.991891	1.000067	0.996337
3	15/03/2022	4.729291	0.466128	1.015932	1.023741	1.020122
4	15/03/2022	5.648605	0.229587	0.993225	0.997448	0.995354
5	15/03/2022	4.696696	0.298706	0.993946	0.999726	0.996847
6	26/10/2021	3.570486	0.466159	1.016679	1.031944	1.026343
7	05/11/2021	5.687567	0.276589	1.000507	1.023527	1.02091
8	26/10/2021	3.860331	0.139048	1.027381	1.034358	1.031149

De la misma manera se realizó para la etapa de reposo de la caídas, como lo muestra la Tabla 4. Se definieron los umbrales en un rango de 0.955088 y 1.03477225.

Tabla 4. Definición de umbrales reposo

Sujeto de pruebas	Fecha prueba	Máximo	Mínimo	Cuartil 1	Cuartil 3	Mediana
1	28/04/2022	1.03546	0.924503	1.004559	1.008047	1.006256
2	28/04/2022	1.043129	0.976882	1.003073	1.006649	1.004745
3	28/04/2022	1.055957	0.931087	0.992148	0.994596	0.99332
4	28/04/2022	1.004543	0.98788	0.995323	0.997506	0.996391

De esta manera los umbrales se quedaron de la siguiente manera, caída libre de 0.31611675 g, de impacto 4.719323 g y de reposo en un rango de 0.955088 g y 1.03477225 g.

Se realizaron 40 pruebas como se muestra en la Tabla 5. En ella se ve una mejora considerable con respecto a la primera prueba. Solamante se detectó un falso positivo en caminata y un falso negativo en caída frontal con el cuerpo estático y caída frontal con caminata. Los falsos negativos se presentan cuando ocurre una caída y el algoritmo no la detecta

Tabla 5. Fase dos de pruebas

Actividad	Se detectó caída	No se detectó caída
Caminata	1	9
Trote	0	10
Caída frontal con el cuerpo estático	9	1
Caída frontal con caminata	9	1

5. CONCLUSIONES

Como muestran los resultados de las segundas pruebas, aunque en menor cantidad, aún se detectan falsos positivos en las actividades de caminata y trote. Es por ello que se estará buscando realizar nuevos análisis para definir umbrales más precisos.

Se observa que con sujetos que realizan pasos grandes y con mayor fuerza aún se detectan algunos falsos positivos en la actividad de caminata y de igual manera en el trote. Los sujetos, de altura y peso variable fueron el 3 y el 4.

Se identificó que la caída no detectada o falso negativo, fue debida a una mala colocación del dispositivo, ya que se encontraba muy debajo a 20 centímetros de su posición correcta, generando valores bajos en las aceleraciones.

Se planear realizar nuevos estudios y un análisis de las métricas utilizadas de precisión y de especificidad para evaluar el comportamiento del sistema en ambientes reales. Es decir, del adulto mayor realizando actividades cotidianas, como subir y bajar escaleras, acostarse y levantarse, agacharse y levantarse, etc.

ISSN en trámite

6. REFERENCIAS

[1] E. R. Durán, G. F. R. Camarero, and E. H. Martínez-Esparza, "Incidencia y características de las caídas en un hospital de cuidados intermedios de Barcelona," *Gerokomos*, vol. 28, no. 2, pp. 78–82, 2017.

[2] Z. A. da Silva-Gama and A. Gómez-Conesa, "Factores de riesgo de caídas en ancianos: revisión sistemática Risk factors for falls in the elderly :," *Rev Saúde Pública*, vol. 42, no. 5, pp. 946–956, 2008.

[3] J. R. Silva-Fhon, R. Partezani-Rodrigues, K. Miyamura, and W. Fuentes-Neira, "Causas y factores asociados a las caídas del adulto mayor Causes and factors associated to falls among the Elder Causas e fatores associados aquedas no idoso," *Enfermería Universitaria*, vol. 16, no. 1, 2019.

[4] F. Varas-Fabra, E. Castro Martín, L. Á. Pérula De Torres, M. J. Fernández Fernández, R. Ruiz Moral, and I. Enciso Berge, "Caídas en ancianos de la comunidad: Prevalencia, consecuencias y factores asociados," *Atención Primaria*, vol. 38, no. 8, pp. 450–455, 2006, doi: 10.1157/13094802.

[5] L. Z. Rubenstein and K. R. Josephson, "The epidemiology of falls and syncope," *Clinics in Geriatric Medicine*, vol. 18, no. 2, pp. 141–158, 2002, doi: 10.1016/S0749-0690(02)00002-2.

[6] P. Kannus *et al.*, "Fall-Induced Injuries and Deaths Among Older Adults," vol. 281, no. 20, pp. 1895–1899, 2014.

[7] A. Zorrilla and G. Dahily, "Aspectos sociodemográficos de las caídas en ancianos atendidos por un Grupo Básico de Trabajo," *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 44, no. 8, p. 51, 2011, doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.

[8] S. P. De, S. Hernández, A. Moctezuma, G. Rodrigo, G. Ortega, and R. María, "Caídas en el adulto mayor. Factores intrínsecos y extrínsecos," *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, vol. 40, no. 6, pp. 489–493, 2002.

[9] E. Nacional and N. Unidas, "Comunicado De Prensa Núm. 337 / 19 10 De Julio De 2019 'Estadísticas a Propósito Del … Día Mundial De La Población (11 De Julio) ,`` INEGI, vol. 337, no. 19, pp. 1–13, 2020, [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/Poblacion2020_Nal.pdf

[10] G. Pérolle and I. Etxeberria Arritxabal, "Detector automático de caídas y monitorización de actividad para personas mayores," *Revista Española de Geriatría y Gerontología*, vol. 41, no. Supl 2, pp. 33–41, 2006, doi: 10.1016/s0211-139x (06)73006-2.

[11] L. Tong, W. Chen, Q. Song, and Y. Ge, "A research on automatic human fall detection method based on wearable inertial force information acquisition system," *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Dec. 2009.

[12] M. Vallejo, C. v. Isaza, and J. D. Lopez, "Artificial Neural Networks as an alternative to traditional fall detection methods," *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, no. 1, pp. 1648–1651, 2013, doi: 10.1109/EMBC.2013.6609833.

[13] S. C. A. Murray Toledo, "Desarrollo de una plataforma de monitoreo de caídas en domicilio para adultos mayores," 2020.

[14] L. Valcourt, Y. de La Hoz, and M. Labrador, "Smartphone-based Human Fall Detection System," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 1011–1017, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7437252.

[

ISSN en trámite

Análisis y Modelo de Refactorización para disminuir la deuda técnica en Arquitecturas de Clases con más de una responsabilidad

Juan Antonio Díaz Díaz*. René Santaolaya Salgado*. Blanca Dina Valenzuela Robles*. Olivia Graciela Fragoso Díaz*. Juan Carlos Rojas Pérez*.

*Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.
(e-mail: {m20ce031, rene.ss, blanca.vr, olivia.fd, juan.rp} @cenidet.tecnm.mx)

Resumen: Uno de los principales factores que originan la deuda técnica es la existencia de arquitecturas de clases con más de una responsabilidad, lo que ocasiona un aumento en su fragilidad por presentar más de un motivo para cambios. En este trabajo de investigación, se propone un método de refactorización, cuyo objetivo es separar las responsabilidades existentes en arquitecturas modulares de programas, escritos bajo el lenguaje Java, dejando cada uno de ellos con una única responsabilidad. Se presenta un análisis de posibles escenarios bajo el Lenguaje Unificado de Modelado (UML). Estos escenarios describen las posibles formas y estilos de programación en las que puede llegar a estar el sistema a analizar. Para el análisis del proceso de refactorización se propone que se realice mediante un analizador léxico sintáctico derivado de ANTLR (Another Tool for Language Recognition), junto a la gramática del lenguaje Java en su versión 8.0.

Palabras clave: Escenarios, Deuda Técnica, Principio de Única Responsabilidad, Refactorización, UML.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la producción de software orientado a objetos demanda del ser humano una gran capacidad de imaginación, abstracción y creatividad, para plantear una correcta solución a problemas prácticos de aplicaciones informáticas. Cuando los desarrolladores de software carecen de experiencia y habilidad en el desarrollo, se producen unidades de programas que técnicamente quedan a deber, lo cual se conoce como "Deuda Técnica" (DT).

En este caso, los programas presentan deuda técnica de diseño, concepto introducido por Ward Cunningham en 1992 (Cunningham, 1992). La deuda técnica hace referencia a que un programa cumple con los objetivos, sin embargo, éste no lo hace de la mejor manera y por lo tanto puede reducir su tiempo de vida útil. Esto se debe a que el software cuenta con deficiencias que deben ser atendidas, lo cual aumenta su fragilidad y dificulta su mantenimiento, de no hacerse de manera oportuna, como en toda deuda, los intereses a pagar serán mayores.

Si bien se reconoce este fenómeno de forma general, lo que sigue sin reconocerse, es cómo la DT se manifiesta y afecta específicamente los procesos de software, y cómo las técnicas de desarrollo de software empleadas acomodan o mitigan la presencia de esta deuda (Holvitie *et al.*, 2018).

La carencia de habilidades, experiencia, presiones de tiempo y costo en el desarrollo de sistemas de software y unidades de programa, conduce a la práctica y decisiones incorrectas que derivan en la producción de código desagradable (del inglés: "Smell Code") (Fowler *et al.*, 1999), y finalmente se acumulará deuda técnica. Código desagradable se refiere al código fuente de programas de computadora que, aunque no de la mejor manera, cumple con su meta de valor u objetivo, y que, posiblemente, pueda presentar algún problema de modularidad, fragilidad, rigidez, escalabilidad, movilidad, autonomía, etc.

El código *desagradable* se refiere a ciertas estructuras en el código que violan principios fundamentales de diseño e impactan negativamente en su calidad". Técnicamente, el código *desagradable* no es incorrecto, no son defectos ni impide el correcto funcionamiento del programa. Más bien indica cierta debilidad en el diseño que puede degradar su desarrollo e incrementar el riesgo de fallas.

Algunos ejemplos de incorrectas decisiones de diseño que originan código *desagradable* son:

- Arquitecturas de clases (módulos o paquetes de programa): Arquitecturas con carencia de abstracciones, abstracciones incorrectas, más de una responsabilidad por arquitectura, uso indiscriminado de la herencia, excesiva herencia de implementación, profundas jerarquías de herencia de clases, demasiadas clases hermanas derivadas de una misma clase, altos factores de acoplamiento entre clases, etc.

ISSN en trámite

- Clases: clases demasiado grandes, clases muy pequeñas, clases con excesiva dependencia de implementación de otras clases, violación a la regla de sustitución de Liskov, incorrecto encapsulamiento (sin restricciones de visibilidad), clases complejas con muchos datos y/o métodos, clases con más de una responsabilidad (clases con sobrados métodos y datos para cumplir con una meta de valor u objetivo), clases insuficientes e incompletas (clases que dependen del servicio de otras para alcanzar su meta de valor), clases con métodos nulos, clases con variables huérfanas, clases con excesiva complejidad ciclomática, etc.

Estos factores impiden el reuso, y posiblemente afectan la capacidad de mantenimiento (Kruchten, Ozkaya and L. Nord, 2012) y encarecen la producción del software y el control de su evolución en el tiempo.

En este artículo se trata específicamente una causa que origina deuda técnica en el software existente, debido al código desagradable en arquitecturas de clases de objetos que exhiben más de un motivo para cambios porque no son conformes con el principio de diseño de "Única Responsabilidad".

El principio de única responsabilidad establece que una clase o módulo debe tener una, y sólo una razón para cambios (C. Martin, 2018).

Para efectos de este trabajo de investigación, una responsabilidad es considerada como una secuencia de métodos que colaboran para satisfacer, como meta de valor u objetivo, un requerimiento o capacidad que el sistema debe satisfacer. Una secuencia empieza desde que se lanza un caso de uso por un actor cliente, ya sea éste un actor humano o un actor lógico, y termina hasta que se alcanza la meta de valor u objetivo de la entidad de software.

En términos de software, consideramos que cada módulo proporciona una serie de subrutinas o funciones que pueden provocar cambios de estado y otras funciones o procedimientos que pueden dar a un programa de usuario los valores de las variables que componen ese estado (Lorge Parnas, 1972).

En este trabajo, se considera a un módulo de programa o paquete como una secuencia funcional completa para atender a un caso de uso o requerimiento, iniciando con una función pública en una clase pública. Estas funciones pueden estar ubicadas en una única clase o un grupo de clases en colaboración.

El concepto de única responsabilidad es un término relativo, que depende de la estructura interna de varios niveles de abstracción que denota la capacidad funcional de un componente o entidad de software. Para atender un servicio, éste puede ser a nivel de función, de requerimiento, de subsistema o sistema completo.

Como niveles de abstracción estructural, en su mínima expresión, una función tiene la responsabilidad de alcanzar la meta con una única operación. En su máxima expresión, un sistema completo tiene como responsabilidad alcanzar la meta de gestión de los procesos de negocios. En estos dos extremos existen niveles intermedios tales como: una clase de objetos con responsabilidad cuya meta de valor es la representación del comportamiento de una entidad del mundo real; o bien comunidades de clases en colaboración, cuya meta de valor es la responsabilidad de satisfacer requerimientos o capacidades específicas de un sistema de software.

Una arquitectura modular que cuenta con más de un motivo de cambio, entonces esa arquitectura puede que tenga más de una responsabilidad, lo cual es difícil de ver. El efecto indeseable que se tiene en arquitecturas de software con esta característica radica en bajos niveles de cohesión y de coherencia, sujetas a más de un motivo de cambios, lo que produce fragilidad en el software. La fragilidad se manifiesta por los continuos cambios que suceden en estas entidades de software, lo que los hace susceptibles de fallas inesperadas que se pueden propagar a través de varios módulos o entidades del sistema.

Adicionalmente, los diferentes cambios impiden la aplicación del principio de "abierto-cerrado" en todas sus dimensiones de cambio, el cual es un principio fundamental para arquitecturas orientadas a objetos, que indica que las entidades de software deben ser cerradas a modificaciones o cambios y abiertas a las extensiones de comportamiento funcional (Meyer, 1997).

Contar con alta cohesión y alta coherencia en el diseño de arquitecturas modulares orientadas a objetos influye directamente en la cantidad de "responsabilidades" en la arquitectura. A la vez, contar con una única responsabilidad por módulo, aunado con los factores de Aislamiento e Independencia se obtendrá Autonomía. La Autonomía también tendrá influencia en la Modularidad y por ende en la Reusabilidad del software.

2. MODELO Y MATERIALES DE SOLUCIÓN

El desarrollo tecnológico que deriva en ésta publicación se trata de construir un sistema de refactorización de alta escala, que automatice la detección, valoración y corrección de código desagradable presente en los activos de software existente, causados por el quebranto del principio de única responsabilidad para separar las secuencias de métodos interactivos que denotan responsabilidades en módulos diferentes.

Este sistema parte de un analizador léxico-sintáctico con las acciones semánticas que identifiquen la situación de duplicidad de responsabilidades y recabar la información necesaria para cuantificar el nivel de deuda técnica generada por este código desagradable.

2.1 Modelo

El modelo identifica específicamente las secuencias de métodos dentro de una arquitectura modular, en las que se encuentre más de una responsabilidad o más de una meta de valor. Dicho modelo, es una estructura de objetos, que tiene la finalidad de

ISSN en trámite

representar la información del código analizado: módulos, clases, atributos, métodos y secuencia de métodos.

En la Fig. 1 se muestra el modelo BPMN (Business Process Model and Notation), del proceso del método de refactorización.

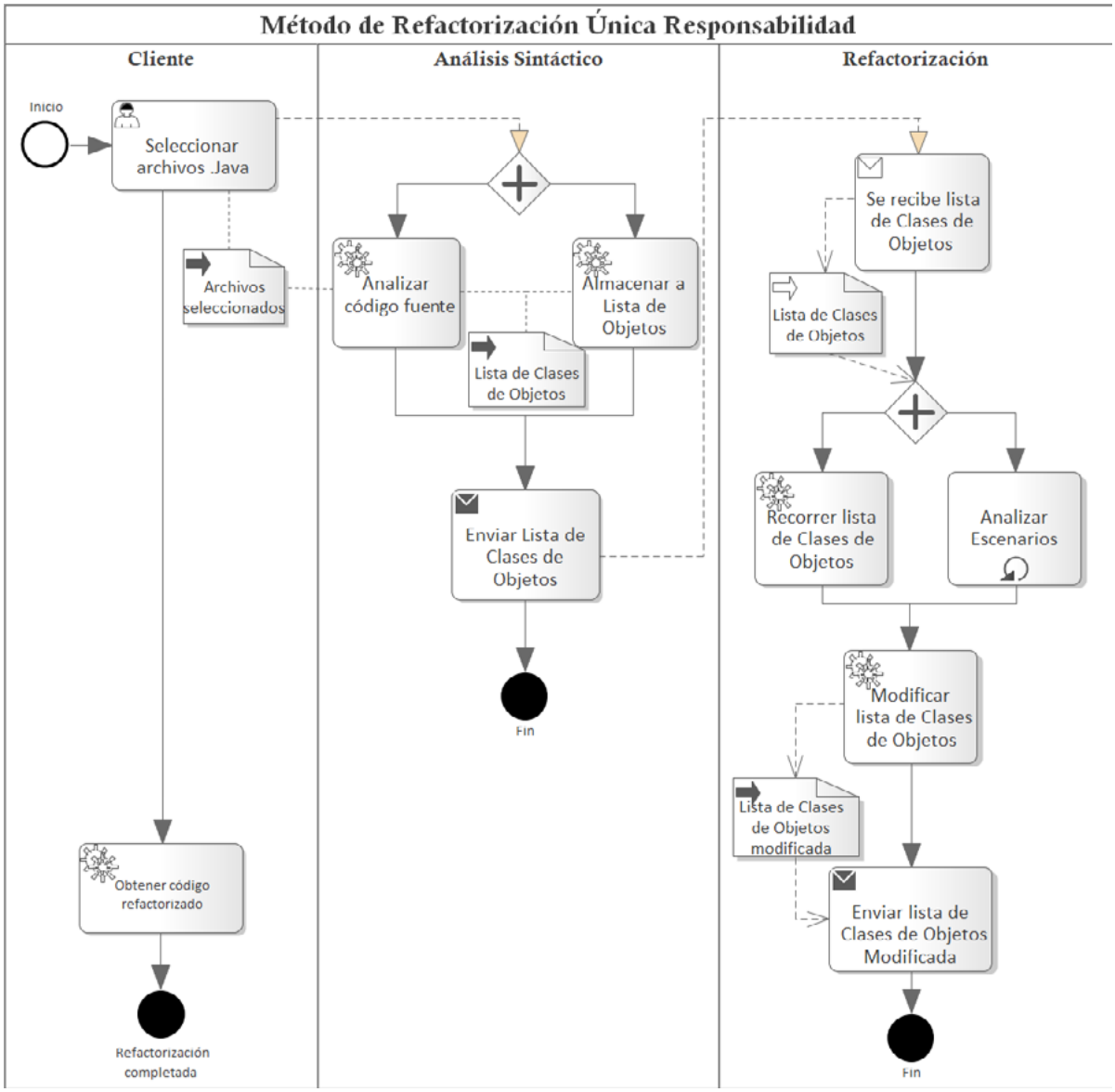


Fig. 1 Método de Refactorización.

ISSN en trámite

El sistema que implementa la técnica de refactorización se apoya de los siguientes subsistemas:

- Un cliente encargado de seleccionar los archivos Java para su análisis.
- Un analizador léxico sintáctico derivado de ANTLR con la gramática del lenguaje Java en su versión 8.
- El Proceso de Refactorización que recibirá como entrada la información contenida en una lista de Clases de Objetos que implementa al modelo o estructura de objetos mencionada.

2.2 Análisis Sintáctico

El análisis se realiza mediante el uso de la herramienta ANTLR (Another Tool for Language Recognition). ANTLR es un analizador léxico y sintáctico para archivos (Parr, 2013), utiliza un archivo con la definición de la gramática del lenguaje del código fuente sujeto de análisis.

Este trabajo utiliza esta herramienta para el análisis de archivos Java que corresponden al código fuente de un sistema de software. Este análisis se complementa con la definición de acciones semánticas que permiten la generación de estructuras de datos contenedoras de la información pertinente para la refactorización.

En la Fig. 2 se muestra una porción de la lista de Clases de Objetos obtenida durante el proceso de análisis sintáctico:

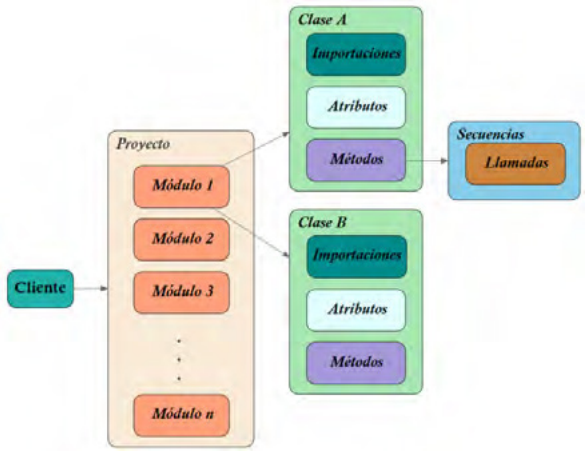


Fig. 2. Lista de Clases de Objetos.

Durante el proceso de análisis se tiene como objetivo extraer la información que ayuda a determinar las responsabilidades existentes en módulos de software. La información que apoya la realización del proceso de refactorización es la siguiente:

Cliente: Actor humano o lógico que utiliza puntos de entrada hacía los servicios requeridos a los métodos públicos.

Proyecto: Representa al proyecto de un software existente a analizar, el cual contendrá los módulos que serán evaluados para obtener las responsabilidades existentes. Dentro de esta lista de módulos obtendremos la siguiente información:

Clases: Aquí se recaba la información de las importaciones, atributos y métodos que conforman a cada una de las clases de objetos en el sistema bajo estudio.

Secuencias: Esta estructura contiene la información de las llamas entre los métodos que participan para alcanzar o cubrir una meta de valor.

La información anterior será almacenada por cada uno de los módulos que contenga el sistema a analizar.

Cada aplicación Java debe tener un método *main* que es donde comienza la ejecución de la misma. Este método se llama antes de la creación de un objeto y ha de declararse como *static* para que se pueda llamar sin tener que referirse a una instancia particular de la clase. Además, es llamado por código fuera de su clase por lo cual tiene que ser declarado como *public.* Esta es la forma de permitir que un miembro de una clase pueda ser utilizado por código que está fuera de la misma (S. Dean and H. Dean, 2007).

2.3 Refactorización

Dependiendo el contexto (Fowler, 2018) define el término Refactorización:

Como nombre o sustantivo: refactorización es “un cambio hecho a la estructura interna de un software para hacerlo más fácil de entender y más barato de modificar sin cambiar su comportamiento observable”.

Como verbo: refactorizar es la “reestructura de software aplicando una serie de cambios sin cambiar su comportamiento observable”.

Fowler combina ambas definiciones en una sola, quedando el término de refactorización como: “El proceso de cambiar un sistema de software, de tal forma que no se altere su comportamiento externo, aunque mejore su estructura interna”.

La refactorización no cambia el comportamiento de un programa, esto es, si el programa es ejecutado dos veces (antes y después de la refactorización) con la misma entrada, la salida será la misma. Las refactorizaciones preservan el comportamiento para que, cuando las precondiciones de la refactorización sean cumplidas, no hagan que falle el programa.

ISSN en trámite

Durante esta etapa se recibirá como entrada la información contenida en la Lista de Clases de Objetos anteriormente mencionada, la cual será evaluada de la siguiente manera:

1. Por cada módulo que conforma el sistema se realiza el siguiente proceso:
   a. Se detectan los puntos de entrada hacía los métodos públicos.
   b. Se calcula el número de responsabilidades (secuencia de métodos) contenidas en cada módulo, las cuales serán divididas.
   c. Se generan nuevos módulos de acuerdo al número de responsabilidades y se agregan a una nueva Lista de Objetos.
2. Por cada una de los módulos o paquetes que conforman la lista creada en el punto 1:
   a. Se obtiene el número de relaciones entre atributos y métodos.
   b. Se crean nuevas clases de acuerdo al número de relaciones.

2.4 Análisis de Escenarios

Dada la diversidad heurística de estilos de programación que existe, se hizo un análisis lo más completo posible con respecto al estilo de programación cómo puede estar integrado el código a refactorizar. El análisis de escenarios se efectuó bajo lineamientos del Lenguaje Unificado de Modelado (UML). Los escenarios describen las posibles formas y estilo de programación en las que puede llegar a estar el sistema de software que se sujeta a estudio para su refactorización

Cada responsabilidad está dada por una secuencia de métodos, dicha secuencia inicia con un método público, es formada por las invocaciones de un método a otro método. Una secuencia termina cuando un método ya no invoca a otro método y regresa el control hacía el método llamador y así sucesivamente.

A continuación, se presentan diagramas de clases que ejemplifican la representación en UML de los escenarios en donde el método realiza los cambios necesarios para dividir las responsabilidades en módulos pertenecientes al sistema.

En la Fig. 3 se aprecia el mejor de los escenarios posibles, cuando un módulo sólo cuenta con una única responsabilidad, por lo tanto, el sistema al detectar este tipo de escenario, deja el módulo tal como se encuentra, sin cambios.

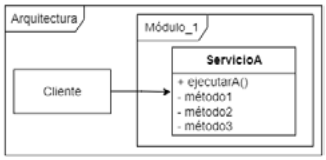


Fig. 3. Escenario 1. Una Responsabilidad

En este caso, podemos a llegar a tener la siguiente secuencia con las llamadas de método como se muestra a continuación: Cliente → ejecutarA() → método1 → método2 → método3.

En la Fig. 4 se muestra un escenario donde en un módulo puede existir más de una responsabilidad, donde existe un cliente que está haciendo uso de dos puntos de entrada hacía dos secuencias totalmente independientes dentro del módulo.

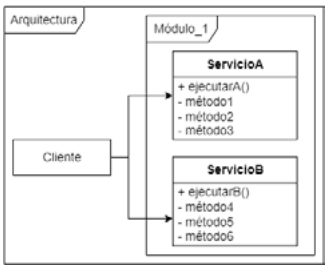


Fig. 4. Escenario 2. Más de una Responsabilidad

Las secuencias pueden estar dadas como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de secuencias Escenario 2.

Módulo	Clases	Secuencias	Responsabilidades
Módulo_1	ServicioA	EjecutarA() → método1 → méotdo2 → método3.	1
	ServicioB	EjecutarB() → método4 → méotdo5 → método6.	1
	Número total de Responsabilidades por Módulo		2

Dicha arquitectura al presentar más de una responsabilidad, tiene que ser evaluada y refactorizada. Después de realizar la refactorización, como salida se tiene la arquitectura que se muestra en la Fig. 5, donde cada módulo estará formado por una sólo secuencia de métodos, es decir, una única responsabilidad.

ISSN en trámite

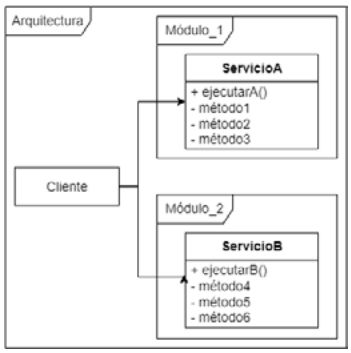


Fig. 5 Escenario 2. Refactorizado

Otro escenario considerado es cuando las clases están relacionadas. Esto permite que una clase conozca los atributos, operaciones y relaciones de otras clases, como se muestra en la Fig. 6. La relación más débil que puede existir entre dos clases es una relación de Dependencia.

Una dependencia entre clases significa que una clase utiliza, o tienen conocimientos de otra clase, o dicho de otro modo "lo que una clase necesita conocer de otra clase para utilizar objetos de esa clase" (Hamilton and Miles, 2006).

Un criterio clave en la división de módulos es la independencia, esto es, el menor acoplamiento entre módulos; otro criterio es que cada módulo deba ejecutar una sola secuencia. Los criterios fundamentales son acoplamiento y cohesión entre módulos.

El acoplamiento se refiere al grado de interdependencia entre módulos, por lo cual es preciso minimizar dicho acoplamiento entre éstos. La cohesión es la fortaleza interna de un módulo, esto es, lo fuertemente relacionadas que están entre sí las entidades locales de dicho módulo.

Los módulos de un programa deben estar débilmente acoplados y fuertemente cohesionados.

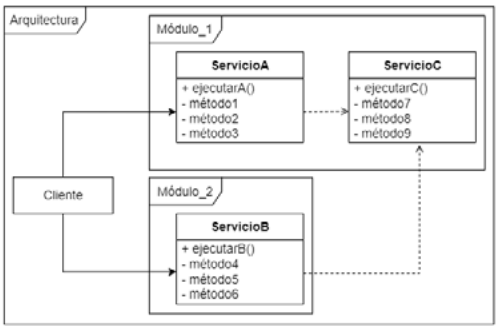


Fig. 6 Escenario 3. Dependencia entre módulos

A continuación, se muestra en la Tabla 2 como pueden estar dadas las secuencias en cada uno de los módulos.

Tabla 2 Ejemplo de secuencias Escenario 3.

Módulo	Clases	Secuencias	Responsabilidades
Módulo_1	ServicioA	EjecutarA() → método1 → méotdo2 → método3 → EjecutarC() → método7 → méotdo8 → método9	1
	ServicioB	EjecutarC() → método7 → méotdo8 → método9.	1
Módulo_2	ServicioB	EjecutarB() → método4 → méotdo5 → método6 → EjecutarC() → método7 → méotdo8 → método9.	1
	Número total de Responsabilidades Módulo_1		2
	Número total de Responsabilidades Módulo_2		1

Dicha arquitectura, presenta en su módulo_1 más de una responsabilidad, al ser evaluada y refactorizada, se espera obtener una arquitectura como se muestra en la Fig. 7, donde cada módulo estará conformado por una sola secuencia de métodos, que representa una única responsabilidad.

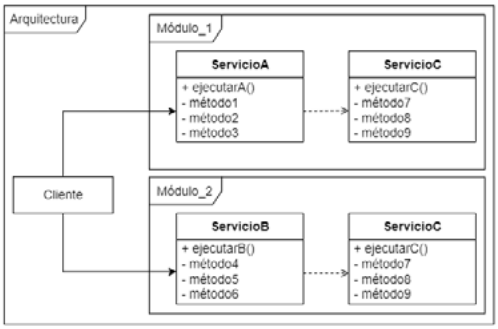


Fig. 7 Escenario 3. Refactorizado

ISSN en trámite

3. CONCLUSIONES

El software monolítico no es fácil de entender para un ingeniero de software, debido a su alto número de trayectorias de control, alcance de referencias, número de variables y por su complejidad general. Es por ello que se pretende la división del software en componentes más pequeños, llamados módulos, que se integran para satisfacer los requerimientos del problema.

Actualmente se sigue trabajando en buscar y analizar más escenarios que tengan dentro de sus arquitecturas problemas de deuda técnica producida por arquitecturas con más de una responsabilidad.

Al llevar a cabo el análisis de arquitecturas como la mostrada en la Fig. 6 Escenario 3, nos encontramos con problemas que relacionan el principio "DRY (Don't Repeat Yourself)" el cual nos dice que; una pieza de código debe existir exactamente en un lugar. Pero de cierto modo se estará cumpliendo con la finalidad de este tema de investigación, el cual consiste en mantener módulos con una única responsabilidad.

REFERENCIAS

C. Martin, R. (2018) *Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design*. Pearson.

Cunningham, W. (1992) 'The WyCash Portfolio Management System', in. *Addendum to the Proceedings on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications*, Vancouver, British Columbia, Canada: Association for Computing Machinery (OOPSLA '92), pp. 29–30.

Fowler, M. *et al.* (1999) *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. 1st Edition. Addison-Wesley.

Fowler, M. (2018) *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. 2nd Edition. Addison-Wesley Professional.

Hamilton, K. and Miles, R. (2006) *Learning UML 2.0: A Pragmatic Introduction to UML*. 1st Edition. O´Reilly Media, Inc.

Holvitie, J. *et al.* (2018) 'Technical Debt and Agile Software Development Practices and Processes: An Industry Practitioner Survey', *Information and Software Technology*, pp. 141–160.

Kruchten, P., Ozkaya, I. and L. Nord, R. (2012) 'Technical Debt: From Metaphor to Theory and Practice', *IEEE Computer Society Press*, pp. 18–21.

Lorge Parnas, D. (1972) 'A Technique for Software Module Specification with Examples', *Communications of the ACM*, pp. 330–336.

Meyer, B. (1997) *Object-Oriented Software Construction*. 2nd Edition. Santa Barbara, CA: Prentice Hall.

Parr, T. (2013) *The Definitive ANTLR 4 Reference*. 2nd Edition. Dallas, Texas: The Pragmatic Bookshelf.

S. Dean, J. and H. Dean, R. (2007) *Introduction to Programming with Java: A Problem Solving Approach*. 1st Edition. McGraw Hill.

ISSN en trámite

Uso de IA en la gestión de movilidad en periodos de pandemia: una Revisión Sistemática de la Literatura

Luis Francisco Pérez Guillén, Nimrod González Franco, Máximo López Sánchez, Hugo Estrada Esquivel, Juan Gabriel González Serna

Departamento de Ciencias de la Computación, TecNM/CENIDET, Morelos 62490, México;
m21ce064@cenidet.tecnm.mx (F.P.G.); nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx (N.G.F.); maximo.ls@cenidet.tecnm.mx (M.L.S.); hugo.ee@cenidet.tecnm.mx (H.E.E.); gabriel.gs@cenidet.tecnm.mx (G.G.S.)

Resumen: A raíz de las dificultades originadas por la pandemia, los sistemas de transporte han sufrido cambios en el modo de operar y el comportamiento de los usuarios ha sido diferente, complicando la gestión de la movilidad. El empleo de la Inteligencia Artificial (IA) permite generar recomendaciones para mejorar dicha gestión considerando las variables que afectan la movilidad humana. En este artículo, se presenta una revisión sistemática sobre el tema de Uso de IA en la gestión de movilidad en periodos de pandemia.

Palabras clave: Gestión de movilidad, inteligencia artificial, ciencia de datos, acciones de mejora, periodo de pandemia de COVID-19.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la población mundial trabaja en recuperarse de la propagación del virus SARS-CoV-2, causante de la enfermedad COVID-19 declarada pandemia en marzo de 2020 [1]. Esta enfermedad puede transmitirse principalmente por medio de fómites (superficies contaminadas), al igual que el contacto directo, indirecto o estrecho con personas infectadas mediante las secreciones contaminadas, por ejemplo, la saliva, las secreciones respiratorias o las gotículas respiratorias que se expulsan cuando una persona infectada tose, estornuda, habla o canta [2], presentándose en México 5,767,332 casos confirmados [3] al 24 de mayo de 2022.

La gestión de movilidad consiste en mejorar la oferta de transporte mediante un conjunto de estrategias destinadas a utilizar los recursos de manera más eficiente. Para poder cumplir con su finalidad, es importante centrarse en encontrar alternativas al movimiento de personas y mercancías por medio de la integración de múltiples estrategias para mejorar las opciones de viaje y fomentar el uso de sistemas de transporte de bajo costo y con menor impacto ambiental. Por estos motivos, se enfoca principalmente en áreas urbanas saturadas de congestión vial promoviendo el uso compartido de automóviles, el transporte público y medio de transporte no motorizados [4].

El aprendizaje automático, también conocido como *Machine Learning* (ML), dista del método de programación habitual y tiene la finalidad de automatizar soluciones para los problemas con una complejidad elevada que requieren el estudio de algoritmos y técnicas para ello, además forma parte de IA, siendo esta un campo de estudio más amplio que ML, al emplear diferentes métodos para hacer que las máquinas sean inteligentes [5].

La pandemia de COVID-19 causó un gran impacto en el comportamiento de los usuarios relacionado con el transporte público, ya que necesitan establecer un sistema integral de prevención y control de emergencias respetando los protocolos de distanciamiento social [6-10]. Para mejorar la situación, se requiere un replanteamiento significativo de cómo reorganizar y rediseñar los espacios físicos que nos rodean a partir de los datos de movilidad, teniendo en cuenta las diferencias entre regiones para mitigar la propagación de COVID-19 [11-13].

Por lo tanto, se presenta una revisión sistemática de la literatura (RSL) con el objetivo de explorar las técnicas de IA en la implementación de acciones de mejora, así como de su efectividad relacionadas con la gestión de movilidad e intervenciones de salud destinadas a contener la pandemia del virus SARS-CoV-2.

2. MÉTODOS

Con la finalidad de realizar esta RSL y siguiendo buenas pràcticas, se consideraron criterios de elegibilidad y estrategias de búsqueda, además, se realizó la selección de artículos y la extracción de información como se describe a continuación.

2.1 Criterios de elegibilidad

Para los propósitos de la revisión, es importante que los artículos estén escritos en inglés y publicados del año 2017 en

ISSN en trámite

adelante. Además, se definieron los siguientes criterios de elegibilidad:

- Artículos que incluyen la implementación de IA en la mejora de la gestión de movilidad.
- Artículos que incluyen el uso de IA en la implementación de estrategias para contener la pandemia de COVID-19 en espacios cerrados.

2.2 Estrategia de búsqueda

Las fuentes de información consultadas fueron: *Google Scholar, IEEExplore, ScienceDirect*, *SpringerLink*, *MDPI* y *arXiv*. La ejecución de las consultas se realizó entre septiembre de 2021 y marzo de 2022.

Se crearon cadenas de búsqueda con diferentes combinaciones de palabras clave tomadas de cuatro grupos principales: gestión de movilidad, datos de movilidad, periodo y técnicas computacionales (Tabla 1).

Tabla 1. Grupo de palabras clave de búsqueda.

Grupos	Palabras claves
Gestión de movilidad	*Mobility management, public transport*
Datos de movilidad	*Passenger tracking, travelers tracing*
Periodo de tiempo	COVID-19 *pandemic*
Técnicas computacionales	*Machine learning, artificial intelligence, microsimulation systems, intelligent transport systems.*

Las palabras clave dentro de cada grupo se conectaron usando el operador OR y los grupos con el operador AND; las cuatro combinaciones de grupos para las consultas de búsqueda fueron:

1. *Mobility management OR Public transport AND Passenger tracking OR Travelers tracing AND COVID-19 pandemic AND Machine learning OR Artificial intelligence OR Microsimulation systems OR Intelligent transport systems.*
2. *Mobility management OR Public transport AND Passenger tracking OR travelers tracing AND COVID-19 pandemic.*
3. *Mobility management OR Public transport AND COVID-19 pandemic AND Machine learning OR Artificial intelligence OR Microsimulation systems OR Intelligent transport systems.*
4. *Mobility management OR Public transport AND COVID-19 pandemic.*

Las cadenas de búsqueda fueron introducidas en los buscadores de las fuentes de consulta seleccionadas, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Total de artículos recuperados de las fuentes de consulta antes de aplicar las técnicas de cribado.

No. de cadena	Google Académico	IEEExplore	Science Direct	Springer Link	MDPI	arXiv
1	1380	349539	450468	1272	1	0
2	4060	22526	219380	1524	1	0
3	21100	349539	443412	2999	2	2
4	48400	22469	218215	6070	83	27

2.3 Selección de artículos

Los trabajos resultantes de cada consulta fueron analizados mediante el siguiente proceso: (1) verificación por publicación duplicada; (2) evaluación de los criterios de exclusión basados en el título, el resumen y las palabras clave; y (3) evaluación de los criterios de elegibilidad basados en el texto completo. Este proceso se llevó a cabo individualmente y no fue revisado por pares; sólo los resultados fueron revisados por el supervisor del trabajo de investigación.

Los artículos que no cumplieron con los criterios de selección fueron descartados. Aquellos que fueron seleccionados se almacenaron para su posterior análisis.Durante esta etapa se logró identificar 25 artículos relacionados con el tema de estudio.

2.4 Extracción de información

Después de realizar la selección final de los artículos se extrajeron diferentes datos: datos generales (autores e instituciones de origen, nombre de la revista o conferencia), datos del experimento (datos recopilados de los pasajeros y del entorno), datos relacionados con modelos de clasificación (tipos de modelos de aprendizaje automático, características extraídas de los datos del experimento o rendimiento) y datos relacionados con los resultados (hallazgos y conclusiones).

3. RESULTADOS

Posteriormente a la lectura de los 25 trabajos seleccionados y a pesar de que en su mayoría presentan buenos resultados e información útil, se observó que 17 de ellos presentan de manera precisa, información altamente valiosa para cumplir el objetivo de esta investigación, que como se mencionó en la sección introductoria, fue conocer las técnicas de IA en la

ISSN en trámite

implementación de acciones de mejora así como su efectividad en la gestión de movilidad, además de intervenciones de salud destinadas a contener la pandemia del virus SARS-CoV-2.

Los trabajos seleccionados fueron organizados por: (a) investigaciones enfocadas a la implementación de IA en la mejora de la gestión de movilidad (Tabla 3), (b) artículos que contemplan el uso de IA en la implementación de estrategias para contener la pandemia de COVID-19 en espacios cerrados (Tabla 4) y (c) trabajos relacionados con sistemas de microsimulación de movilidad (Tabla 5).

Tabla 3. Resumen de artículo sobre la implementación de IA en la mejora de la gestión de movilidad

Artículo	Objetivo	Técnicas / Algoritmos	Resultados
[14]	Implementar un modelo de detección de objetos con la finalidad de monitorear la sana distancia de los pasajeros de la estación de trenes de Bandung.	*YOLOv4*. *DeepSORT*. CCTV.	96.5% con las métricas *Accuracy* y *Recall* con un rendimiento de 15-18 fps en el seguimiento de pasajeros.
[15]	Analizar la factibilidad de incorporar tecnologías de actualidad como IA, IoT, 5G, Big Data en combinación de CCTV y sensores en las redes ferroviarias durante el periodo de pandemia.	IA IoT 5G Big Data CCTV.	La integración de IA con las tecnologías consideradas en ubicaciones de transporte público, logrará generar un entorno de control ferroviario confiable y de amplio alcance que requiera menos intervención humana, con la finalidad de mejorar la salud y la seguridad de los usuarios frente a la pandemia de COVID-19.
[16]	Desarrollar modelos de predicción de movilidad para respaldar y mejorar el rendimiento operativo de la red ferroviaria de Londres apoyándose de la red 5G.	Sensores WiFi, Bluetooth y UWB. 5G. *Support Vector Machine*.	Mejor resultado fue *Artificial Neural Network* con el resultado *Precision* = 91.17%.
[17]	Monitorear los pasajeros de la red ferroviaria de Londres para obtener recomendaciones que permitan gestionar adecuadamente el flujo diario de usuarios de entre 16 y 59 años, y mayores de 60 usando seis algoritmos.	Sensores WiFi, Bluetooth y UWB. *Logistic Regression*. *Multi-layer Perceptron*. *Random Forest*. *K-Nearest Neighbour*. *Decision Tree*. *Support Vector Machine*.	Mejor resultado en el grupo de 16 a 59 años fue *Support Vector Machine* con los siguientes resultados *Accuracy* = 81.96% *Precision* = 81% *Recall* = 79% *F1 Score* = 79% Mejor resultado en el grupo de 60 años en adelante fue *Support Vector Machine* con los siguientes resultados *Accuracy* = 86.43% *Precision* = 86% *Recall* = 84% *F1 Score* = 84%
[18]	Predecir la eficiencia y las variaciones de 3 modos de transporte en todo el mundo y evaluar los modos de transporte entre 6 regiones.	*Support Vector Machine*. *Naive Bayes*. *Multi-layer Perceptron*. *Logistic Regression*. *K-Nearest Neighbour*. *Random Forest*.	Mejor resultado en los diferentes modos de transporte en todo el mundo fue *Support Vector Machine* con los siguientes resultados *Accuracy* = 91.25% *Precision* = 91% *Recall* = 90% *F1 Score* = 90% Mejor resultado en las diferentes regiones de transporte fue *Random Forest* con los siguientes resultados *Accuracy* = 84.5% *Precision* = 84% *Recall* = 83% *F1 Score* = 84%
[19]	Realizar una revisión de diversos trabajos enfocados en el uso de IA y otras tecnologías para la mejora de la movilidad con la finalidad de determinar si esto podría ayudar durante la pandemia de COVID-19.	IA *Machine learning*.	Es factible lograr una mejorar de la eficiencia global de los sistemas de transporte mediante la implementación de métodos y tecnologías de IA.
[20]	Desarrollar una herramienta para predecir la información sobre el flujo del tráfico de forma precisa y oportuna.	*Random Forest*. *Decision Tree*. *Support Vector Machine*.	Mejor resultado fue *Random Forest* con los siguientes resultados *Accuracy* = 91% *Precision* = 88.88% *Recall* = 82% Tiempo de ejecución = 110.1 s.
[21]	Desarrollar algoritmos y software para un sistema de control inteligente para el transporte terrestre urbano en las megalópolis tomando como objeto de estudio la ciudad de Moscú.	Red neuronal.	El desarrollo de hardware y software permite resolver de manera efectiva los problemas de organización y operación del sistema de transporte público, garantizando la seguridad y la comodidad de todos los pasajeros.
[22]	Identificar las variables más significativas en relación con los viajes en Estados Unidos.	*Ridge* *LASSO* *Elastic Net*	El modelo de regresión *Ridge* funcionó mejor teniendo un menor error cuadrático medio durante el entrenamiento (0.63612) y la etapa de prueba (0.2413).
[23]	Detectar 8 modos de transporte mediante el uso de los datos de los sensores que	Sensores GPS, acelerómetro y	Viaje en automóvil: -Puntuación *F-measure*: 0.96. -Área bajo la curva: 0.963.

ISSN en trámite

	se encuentran en los teléfonos inteligentes.	giroscopio de los teléfonos inteligentes. *t-SNE.* *Support Vector Machine.*	-Curva ROC: 0.979. Otros tipos de transporte: -93% de acierto. Caminar y Correr: -*Precision* superior al 99%.
[24]	Analizar los patrones de movilidad durante un período de tres meses (mayo, junio y julio), durante el verano de 2020, en tres condados de Florida: Miami-Dade, Broward y Palm Beach en Estados Unidos.	*Random Forest.*	Palm Beach: $r = 0.6672$ Broward: $r = 0.5774$ MiamiDade: $r = 0.4946$ Existen diferencias en los patrones de movilidad entre los condados con respecto a factores relaciones, como, por ejemplo, la raza y el origen étnico, así como el distanciamiento social o factores relacionados con los viajes (como quedarse en casa) durante, antes y después del pico de casos de COVID-19.
[25]	Identificar sistemas de epidemiología a partir de observaciones ruidosas y dispersas con incertidumbre cuantificada.	Redes neuronales profundas.	El parámetro que cuantifica la cantidad de viajes a los lugares de trabajo es el más relevante entre todos los parámetros de movilidad y comportamiento social.

Tabla 4. Resumen de artículo sobre el uso de IA en la implementación de estrategias para contener la pandemia de COVID-19 en espacios cerrados

Artículo	Objetivo	Técnicas / Algoritmos	Resultados
[26]	Monitorear en tiempo real el distanciamiento social entre personas y controlar la capacidad en espacios interiores comunes a través de una arquitectura multicapa que integra soluciones de IoT, niebla y la nube.	Dispositivos del paradigma IoT. Computación en la niebla. Computación en la nube. Algoritmos de clasificación.	Mejor resultado fue *Random Forest* con el resultado *Precision* = 97%.
[27]	Proponer un modelo para reforzar las medidas de salud pública.	*Machine learning.* *Edge computing.*	El desarrollo y la aplicación eficiente del paradigma de IoT propuesto puede gestionar el estado actual de la situación relacionada con la pandemia de COVID-19, evitando que se produzcan más brotes en las regiones geográficas, reanudar las actividades económicas y proporcionar una infraestructura de emergencia adecuada para la población en crisis.
		Dispositivos del paradigma IoT.	
[28]	Realizar una revisión sistemática de la literatura, independientemente del idioma o estado de publicación, incluyendo todos los estudios que utilizaron IA y/o ML para desarrollar o validar una intervención de salud pública y sus posibles resultados.	Búsquedas en *Nursing Refe-rence Center Plus*, *CHINAHL*, *Scopus*, *PubMed* y *Living Evidence*.	Los responsables políticos podrían haber definido de una mejor forma las mejores estrategias para contener la pandemia de COVID-19 desde el final de la primera ola mediante el uso de IA y ML. El distanciamiento social solo debe considerarse efectivo cuando se combina con otras medidas, incluido el cierre de escuelas y negocios, y la limitación del transporte público.

Tabla 5. Resumen de artículo sobre sistemas de microsimulación de movilidad

Artículo	Objetivo	Técnicas / Algoritmos	Resultados
[29]	Realizar un modelo de microsimulación peatonal para optimizar el área peatonal de uno de los andenes más demandados de Lima, Perú, considerando los protocolos de seguridad establecidos por la pandemia de COVID-19.	Software *Vissim*.	Un mayor número de personas pueden ocupar la terminal siguiendo los protocolos de seguridad para prevenir el contagio de COVID-19 (4,166 personas comparado con 3,937).
[30]	Desarrollar una plata-forma digital basada en un sistema multiagente para tres diferentes escenarios de movilidad en el movimiento de bicicletas y autobuses para contrarrestar las aglomeraciones en el transporte público y así disminuir las infecciones por COVID-19 en la ciudad de Guadalajara.	*NETLOGO.*	Se presentan 3 escenarios, obteniendo en 2 de ellos una distancia segura de 47% y adicionalmente en uno de estos 2 una huella de carbono menor.

ISSN en trámite

4. CONCLUSIONES

En conclusión, durante esta investigación se logró identificar gran cantidad de artículos relacionados con el tema de interés de la RSL. Cabe resaltar que en sus características cada trabajo demuestra que es un área con gran complejidad, debido a que el comportamiento humano es variable incluso de un día para otro, siendo difícil predecir el comportamiento de una persona inclusive para un humano, volviéndose una labor más complicada durante una pandemia.

De manera concreta, los principales hallazgos de la RSL fueron los siguientes:

La técnica de IA más utilizada son los modelos de aprendizaje automático, de los que destacan *Support Vector Machine*, *Random Forest*, *Decision Tree*, *K-Nearest Neighbour*, *Logistic Regression Artificial Neural Network* y *Naive Bayes* para la implementación de estrategias orientadas a contener la pandemia de COVID-19 en entornos de movilidad, mediante el uso de los datos relacionados con la movilidad disponibles de las ubicaciones donde fueron realizadas las investigaciones.

Algunos trabajos hacen uso de sistemas multiagentes con datos obtenidos mediante sensores (GPS, acelerómetro y giroscopio), mientras que otras investigaciones integran tecnologías de actualidad como IoT, 5G, sensores de conectividad inalámbrica (Bluetooth, WiFi, RFID y UWB), *edge computing* y computación en la nube, algunos de ellos integrando estas tecnologías con técnicas de IA.

En lo que respecta a la evaluación de los resultados, se suelen utilizar métricas de regresión, tales como r, R^2, error cuadrático medio (RSME) y error absoluto medio (MAE), así como de las métricas de la matriz de confusión de las que se emplearon: *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *Specificity* y *F1 Score;* obteniendo mejores resultados en un mayor número de investigaciones con los algoritmos *Support Vector Machine* y *Random Forest*, donde el primero de ambos fue el mejor no solo en sus resultados, sino que además demostró que es un algoritmo eficiente al trabajar con los datos de movilidad.

Debe señalarse que, como se afirma en [11], aunque existen diferentes tipos de datos a disponibilidad dependiendo de la estación y la región, a causa de las diferencias sociales y sociodemográficas, no es posible aplicar directamente las propuestas existentes a cualquier entorno.

Con esta investigación, se cumple con el objetivo de explorar las técnicas de IA en la implementación de acciones de mejora, así como de su efectividad relacionadas con la gestión de movilidad e intervenciones de salud destinadas a contener la pandemia del virus SARS-CoV-2.

REFERENCIAS

[1] Fernández-Pérez, G. C., Oñate Miranda, M., Fernández-Rodríguez, P., Velasco Casares, M., Corral de la Calle, M., Franco López, Á., Díez Blanco, M., & Oñate Cuchat, J. M. (2021). SARS-CoV-2: cómo es, cómo actúa y cómo se expresa en la imagen. *Radiología*, *63*(2), 115–126. https://doi.org/10.1016/j.rx.2020.10.006

[2] OMS. (2020). *Transmisión del SARS-CoV-2: repercusiones sobre las precauciones en materia de prevención de infecciones*. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/333390/WHO-2019-nCoV-Sci_Brief-Transmission_modes-2020.3-spa.pdf

[3] Gobierno de México, CONACYT, CentroGeo, GeoInt, & DataLab. (2022). *COVID-19 Tablero México - CONACYT - CentroGeo - GeoInt - DataLab*. Gobierno de México. https://datos.covid-19.conacyt.mx/

[4] SENER, CONUEE, Dirección de Movilidad y Transporte, & de Vivar Arriaga, C. P. R. (2019). *Opciones de Gestión de la Movilidad Urbana*. https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/transporte/fichastecnicas/ficha2opcionesdegestiondelamovilidadurbana_2.pdf

[5] Rebala, G., Ravi, A., & Churiwala, S. (2019). *An Introduction to Machine Learning*. Springer.

[6] Fumagalli, L. A. W., Rezende, D. A., & Guimarães, T. A. (2021). Challenges for public transportation: Consequences and possible alternatives for the Covid-19 pandemic through strategic digital city application. *Journal of Urban Management*, *10*(2), 97–109. https://doi.org/10.1016/j.jum.2021.04.002

[7] Yin, Y. (2020). Thoughts on the Construction of Urban Public Transport Emergency Prevention and Control System in China—learning from the United States. *2020 International Conference on Urban Engineering and Management Science (ICUEMS)*, 331–334. https://doi.org/10.1109/ICUEMS50872.2020.00079

[8] Huang, J., Wang, H., Fan, M., Zhuo, A., Sun, Y., & Li, Y. (2020). Understanding the Impact of the COVID-19 Pandemic on Transportation-related Behaviors with Human Mobility Data. *In Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 3443–3450. https://doi.org/10.1145/3394486.3412856

[9] Liu, L., Miller, H. J., & Scheff, J. (2020). The impacts of COVID-19 pandemic on public transit demand in the United States. *PLOS ONE*, *15*(11), 1–22. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242476

[10] Xue, R., Sun, S., Yang, D., Ma, X., & Dai, M. (2020). The Role of China Rail Network in SARS-CoV-2 Transmission and Intervention. *2020 5th International*

ISSN en trámite

Conference on Information Science, Computer Technology and Transportation (ISCTT), 624–628. https://doi.org/10.1109/ISCTT51595.2020.00118

[11] Hou, X., Gao, S., Li, Q., Kang, Y., Chen, N., Chen, K., Rao, J., Ellenberg, J. S., & Patz, J. A. (2021). Intracounty modeling of COVID-19 infection with human mobility: Assessing spatial heterogeneity with business traffic, age, and race. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(24). https://doi.org/10.1073/pnas.2020524118

[12] Klise, K., Beyeler, W., Finley, P., & Makvandi, M. (2021). Analysis of mobility data to build contact networks for COVID-19. *PLOS ONE*, *16*(4), 1–18. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249726

[13] Ugail, H., Mehmood, I., Aggarwal, R., Iglesias, A., Suárez, P., Maqsood, M., Aadil, F., Campuzano, A., Tajouri, L., Gleghorn, S., Taif, K., Reeve, C., Wan, T., & Redman, R. (2020). On Rearranging Physical Spaces for Enhancing Social Distancing Measures to Combat the COVID-19 Infection Rates. *2020 International Conference on Internet of Things and Intelligent Applications (ITIA)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/ITIA50152.2020.9312322

[14] Ahmad Dahlan, I., Bryan, M., Putra, G., Supangkat, S., Lubis, F., & Hamami, F. (2022). Real-time passenger social distance monitoring with video analytics using deep learning in railway station. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *26*(2), 773–784. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v26.i2.pp773-784

[15] Alawad, H., & Kaewunruen, S. (2021). 5G intelligence underpinning railway safety in the COVID-19 era. *Frontiers in Built Environment*, *7*. https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.639753

[16] Asad, S. M., Ahmad, J., Hussain, S., Zoha, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Mobility Prediction-Based Optimisation and Encryption of Passenger Traffic-Flows Using Machine Learning. *Sensors*, *20*(9). https://doi.org/10.3390/S20092629

[17] Asad, S. M., Dashtipour, K., Hussain, S., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Travelers-tracing and mobility profiling using machine learning in railway systems. *2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/UCET51115.2020.9205456

[18] Asad, S. M., Dashtipour, K., Rais, R. N. B., Hussain, S., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2021). Employing Machine Learning for Predicting Transportation Modes Under the COVID-19 Pandemic: A Mobility-Trends Analysis. *2021 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)*, 235–240. https://doi.org/10.1109/ucet54125.2021.9674960

[19] Bazzan, A. L. (2022). Improving Urban Mobility: using artificial intelligence and new technologies to connect supply and demand. *arXiv preprint arXiv:2204.03570*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.03570

[20] Meena, G., Sharma, D., & Mahrishi, M. (2020). Traffic Prediction for Intelligent Transportation System using Machine Learning. *2020 3rd International Conference on Emerging Technologies in Computer Engineering: Machine Learning and Internet of Things (ICETCE)*, 145–148. https://doi.org/10.1109/ICETCE48199.2020.9091758

[21] Statsenko, A. A., Rogov, A. A., Obukhov, I. V., & Smirnova, E. E. (2021). Developing Software and Hardware for Automation of Ground Urban Transport Traffic Management. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 1102–1105. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396597

[22] Chakraborty, M., Mahmud, S., Gates, T., & Sinha, S. (2020). *Linear Regularization-based Analysis and Prediction of Human Mobility in the U.S. during the COVID-19 Pandemic*. https://doi.org/10.31224/osf.io/szvtc

[23] Sağbaş, E. A., Peker, M., & Balli, S. (2017). A novel approach for transportation mode detection: Combining t-SNE manifold learning and support vector machines. *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/IDAP.2017.8090340

[24] Zhu, G., Stewart, K., Niemeier, D., & Fan, J. (2021). Understanding the Drivers of Mobility during the COVID-19 Pandemic in Florida, USA Using a Machine Learning Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(7). https://doi.org/10.3390/ijgi10070440

[25] Bhouri, M. A., Costabal, F. S., Wang, H., Linka, K., Peirlinck, M., Kuhl, E., & Perdikaris, P. (2021). COVID-19 dynamics across the US: A deep learning study of human mobility and social behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *382*, 113891. https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113891

[26] Yacchirema, D., & Chura, A. (2021). SafeMobility: An IoT- based System for safer mobility using machine learning in the age of COVID-19. *Procedia*

ISSN en trámite

Computer Science, *184*, 524–531. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.066

[27] Vishnu, S., & Jino Ramson, S. R. (2021). An Internet of Things Paradigm: Pandemic Management (incl. COVID-19). *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 1371–1375. https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395966

[28] Payedimarri, A. B., Concina, D., Portinale, L., Canonico, M., Seys, D., Vanhaecht, K., & Panella, M. (2021). Prediction Models for Public Health Containment Measures on COVID-19 Using Artificial Intelligence and Machine Learning: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(9). https://doi.org/10.3390/ijerph18094499

[29] Vásquez Bustamante, J. L., Marcelo Ochoa Chávez, R., Silvera, M., & Castro, F. (2020). Optimization of passengers boarding in the BRT system based on the security protocols established by the Covid-19 pandemic. *2020 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/CONIITI51147.2020.9240352

[30] Briseño, R. A., López, J. C., Arellano, R. M., Larios, V. M., Ramirez, J. B., & López-Zaragoza, C. (2020). Digital Platform to promote sustainable mobility and COVID-19 infections reduction: a use case in the Guadalajara metropolitan area. *2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 1–8. https://doi.org/10.1109/ISC251055.2020.9239013

ISSN en trámite

Atributos de calidad en estándares para recursos de aprendizaje

Alejandra Flores Robles*. Olivia Fragoso Díaz*
Francisco Javier Álvarez Rodríguez. Juan Carlos Rojas Pérez***

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.
(e-mail: m20ce033, olivia.fd, juan.rp@cenidet.tecnm.mx)

**Universidad Autónoma de Aguascalientes
(e-mail: fjalvar@correo.uaa.mx)}

Abstract: En este artículo se presenta un análisis de normas de calidad de recursos de aprendizaje, con el propósito de desarrollar un modelo de calidad que permita evaluar cuantitativamente a los recursos de aprendizaje. A partir del análisis de algunas normas de calidad identificadas, se desarrolló un modelo que describe atributos de calidad y en particular uno para medir la adaptabilidad en recursos de aprendizaje. La propuesta identifica ponderaciones personalizables para medir la adaptabilidad cuantitativamente. El resultado de este trabajo es relevante debido a que se muestra el camino para no depender de mediciones subjetivas o dependientes de usuarios.

Keywords: Recurso de aprendizaje, calidad, normas de calidad, adaptabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos aprendizaje son una forma de organizar y gestionar el conocimiento a partir de las posibilidades que brindan las tecnologías de la Información y las comunicaciones, en particular los entornos virtuales de aprendizaje (Ramírez y Rama, 2014). El desarrollo de recursos de aprendizaje con fines educativos debe realizarse bajo ciertos criterios de calidad, entere los que se encuentran reusabilidad, accesibilidad, usabilidad, adaptabilidad, etc. Sin embargo, lograr medir todos esos atributos resulta en una tarea muy extensa, es decir, se cuenta con conjuntos de atributos que proponen la norma UNE, AENOR, e ISO / IEC 19796-3. En este artículo se propone la definición y medición de la adaptabilidad de recursos de aprendizaje como está descrito en UNE (UNE 71362,2017). Esta definición consiste en establecer características de la adaptabilidad y la relación entre estas, por ejemplo, un recurso de aprendizaje es adaptable si puede ser empleado por más de un usuario, además, si considera el perfil o los diferentes estilos de aprendizaje que puede adoptar cada usuario final.

El objetivo de este trabajo es definir una forma cuantitativa de medir atributos de calidad que sean conforme a estándares de educación. El proceso de definición de la forma de medir inició con un estudio de las normas o estándares más comúnmente publicadas o de las cuales se puede obtener información. En este caso se identificó a la norma UNE 71362 como una norma muy referenciada en la literatura y que propone un conjunto de 15 atributos de calidad. La segunda actividad consistió en describir sub-atributos de calidad que correspondan a los atributos propuestos por la norma. Y la tercera actividad consiste en ponderar los sub-atributos identificados, en particular la atención a un solo atributo que fuera muy mencionado en otros trabajos, pero para el que no se distinguió en. Trabajos relacionados alguna forma cuantitativa de medir. En la sección 2 se describen brevemente las normas estudiadas y en la sección 3 se describen los sub-atributos propuestos que complementan a la norma y las ponderaciones de esos sub-atributos. Finalmente, en la sección 4 se describen las conclusiones de este trabajo.

2. NORMAS ESTUDIADAS

De acuerdo con (Fernández-Pampillón, 2019) "*La norma UNE 71362 proporciona un modelo de base para definir y evaluar, cuantitativa y cualitativamente, la calidad de los materiales educativos digitales*". *Para ello, incluye 15 criterios que permiten medir la eficacia didáctica del material, la eficacia tecnológica y la eficacia respecto a la accesibilidad. Su objetivo es guiar a los productores en la creación de los materiales educativos digitales, a los usuarios en su selección y a los evaluadores en su valoración.*

Los objetivos de esta norma como se especifica en (intef) e resumen en los siguientes objetivos específicos:

- *Guiar la creación de un recurso educativo digital de calidad.*
- *Valorar estos recursos de forma precisa y objetiva.*

ISSN en trámite

- *Facilitar a los usuarios* la elección del mejor MED (Material Educativo Digital).

La calidad de los recursos de aprendizaje se evalúa por medio de una rubrica que pondera los diferentes criterios, sin embargo. En esa rúbrica los docentes asignan puntos de acuerdo con su criterio lo cual de alguna manera mantiene subjetiva la evaluación de la calidad.

La autora (Fernández-Pampillón, 2019) describe la norma mediante 15 criterios: 6 para medir la eficacia didáctica del material: descripción didáctica, calidad de los contenidos, capacidad para generar aprendizaje, adaptabilidad, interactividad, motivación. 4 para la eficacia tecnológica: formato y diseño, reusabilidad, portabilidad, robustez y estabilidad técnica. Y los 5 restantes para la accesibilidad: estructura del escenario de aprendizaje, navegación, operabilidad, accesibilidad de contenido audiovisual y accesibilidad de contenido textual.

Otra norma es UNE 66181: 2012. Calidad de la formación virtual. - Pretende servir como guía para identificar las características de las acciones formativas virtuales, de forma que los usuarios de formación virtual puedan seleccionar los cursos virtuales que mejor se adapten a sus necesidades y expectativas, y que las organizaciones educativas puedan mejorar su oferta y, con ello, la satisfacción de sus alumnos. (Ramírez y Silvera, 2015)

ISO / IEC 19796-3: 2009. Es una tercera norma que se identificó que es importante para describir la calidad de recursos de aprendizaje. En esta norma se trata la gestión, garantía y métricas de la calidad. Aquí se describen cuatro componentes principales que tratan de facilitar la creación de los enfoques de calidad: un formato estructurado para describir los métodos, otro formato para describir las métricas, una colección de métodos de referencia con los que puede gestionar y garantizar la calidad aplicada a diferentes contextos, y un conjunto de métricas e indicadores de referencia que permitirán medir la calidad en procesos, productos, componentes y servicios. (https://standards.globalspec.com/std/1156828/iso-iec-19796-3, 2009)

Adicionalmente, se puede comentar que existe un Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado en España, en el sitio de este instituto se hace referencia a la calidad de los recursos de aprendizaje de acuerdo con los atributos descritos en la Fig.1.

3. SUB-ATRIBUTOS QUE COMPLEMENTAN A LAS NORMAS

Después de analizar las normas descritas en la sección anterior, se construyó el diagrama de la Fig. 2. En este diagrama, los atributos en recuadros de primer nivel de color azul son los atributos que son comunes en las normas estudiadas. Los sub-atributos del segundo nivel y tercer nivel se proponen como complemento para poder evaluar objetivamente los recursos de aprendizaje a través de las ponderaciones otorgadas en cada sub-atributo. En la Fig. 2, el atributo adaptabilidad que se encuentra en el primer nivel y de color verde, se identificó como un atributo importante y que la mayoría de los autores concuerdan como importante pero que poco se explica como medir objetivamente.



Fig.1 Criterios de calidad para evaluar los recursos educativos digitales [Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado]

ISSN en trámite

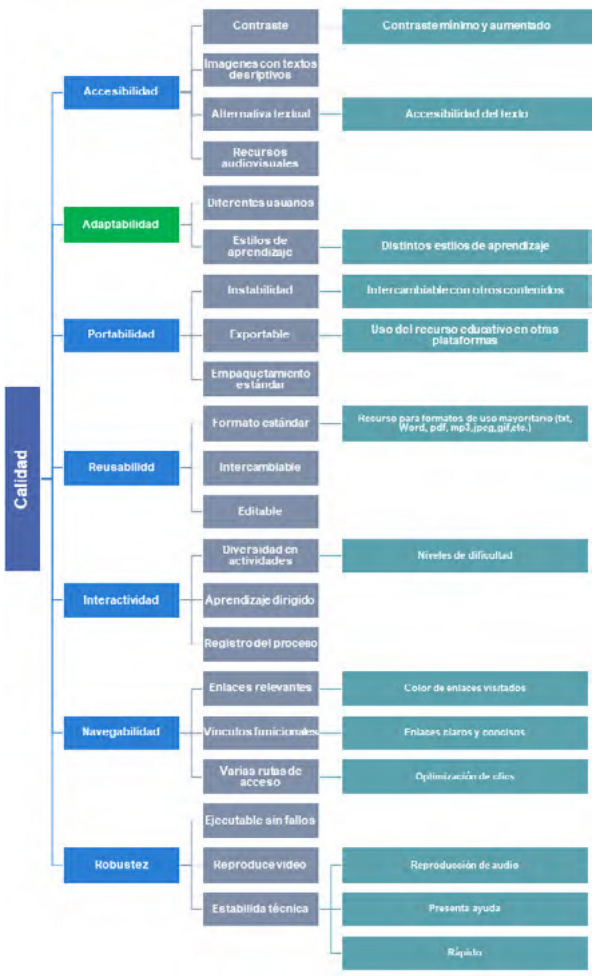


Fig. 2. Modelo de calidad propuesto para recursos de aprendizaje

El desarrollo de este modelo de calidad se realizó conforme a los atributos dados por la norma buscando obtener los sub-atributos, que permitan realizar una evaluación de los recursos de aprendizaje. A partir del análisis de trabajos relacionados se encontró que existe una gran cantidad de investigaciones que miden los recursos con base a accesibilidad, portabilidad, reusabilidad y navegabilidad, pero no hay investigaciones que implementen una evaluación al recurso de aprendizaje que sea adaptable para el usuario final, de tal manera que la adaptabilidad es el atributo para el que se propone especificar el cómo medirlo cuantitativamente.

Para el desarrollo de un modelo cuantitativo de calidad como se muestra en la Fig. 3. El atributo de adaptabilidad se refiere a la facilidad con la que el Recurso de Aprendizaje se adapta a diferentes tipos de alumnos y de profesores. De acuerdo con (Guerrero, Paule, Gutiérrez y Pérez, 2005), se debe valorar si el Recurso de Aprendizaje propone diferentes contenidos/actividades para cada tipo/nivel de competencia de alumno. El profesor o el alumno pueden usar el Recurso de aprendizaje independientemente del método de enseñanza o aprendizaje que utilicen. Así mismo, en (Instituto Escalae) se menciona que el recurso es adecuado para diferentes tipos de alumnos, se ajusta a su nivel y estilos de aprendizaje, y explota diferentes caminos para alcanzar los objetivos didácticos. Esta última definición es la que da la pauta para establecer los sub-atributos a considerar para medir la adaptabilidad. Los conceptos más generales que describen al atributo adaptabilidad se describen a continuación.

- **Diferentes usuarios:** Hace referencia a que el Recurso de Aprendizaje pueda atender requerimientos de diferentes personas.

- **Accesibilidad:** Cualidad que busca garantizar que el curso o recurso pueda ser consultado y/o utilizado por el mayor número de personas, incluyendo a quienes se encuentran en condición de discapacidad, y de igual forma, a aquellos que no cuentan con condiciones técnicas y tecnológicas adecuadas. (http://www.esvial.org/wpcontent/files/2012_elearning_accesible.pdf)

- **Granularidad:** La granularidad es otra de las características que se aplican a los objetos de aprendizaje dentro del contexto de la enseñanza, y que intuitivamente parece estar relacionada con la reusabilidad. La granularidad es la facultad que posee un objeto de aprendizaje para poder determinar, de entre los elementos educativos que lo forman, qué o cuáles mantienen entidad por ellos mismos en el caso de que se aíslen del contexto que proporciona en su conjunto el objeto de aprendizaje. (Menéndez, Nocedal y Corrochano, 2007)

- **Estilos de aprendizaje:** Actualmente existen muchas definiciones de estilos de aprendizaje pero analizando varias de estas se tomó la de Keefe (https://estilosdeaprendizaje.org/) quien da una explicación más certera en esta cuestión donde el determina que los Estilos de Aprendizaje son los rasgos cognitivos, fisiológicos y afectivos, que son los indicadores, de cómo los alumnos perciben, interaccionan y responden a los diferentes ambientes del aprendizaje.(https://bit.ly/3v5piT6, agosto 2021)

- **Aprendizaje visual:** El aprendizaje visual no es más que un estilo ‘’visual’’ ya que es la posibilidad de adquirir conocimientos mediante imágenes, bien sea de: videos, gráficos fotografías, mapas, imágenes etc.

ISSN en trámite

Hacer uso de mapas conceptuales puede ser una gran herramienta, siendo ésta una de las más poderosas a la hora de estudiar. Esto es así puesto que está diseñada para aquellas personas que tienen aprendizaje visual, para así poder memorizar información de manera fácil. (https://estilosdeaprendizaje.org/aprendizaje-visual/)

- **Aprendizaje auditivo:** Se enfoca principalmente en la comprensión y asimilación de la información a través del sistema auditivo. De manera que está representado por el oído y todas sus partes internas. Muchas de las personas que utilizan el sistema de representación auditivo como método principal para adquirir y absorber mejor los conocimientos, lo hacen a través de audiolibros, clases magistrales, podcasts o incluso leyendo en voz alta para memorizar datos. (https://estilosdeaprendizaje.org/aprendizaje-visual/)

- **Aprendizaje kinestésico:** Este aprendizaje está basado por la preferencia por interactuar con el contenido. Este sistema de aprendizaje se desarrolla más lentamente que los anteriores, pero el resultado del aprendizaje tiende a ser más profundo y se asimila con más facilidad. Las personas que optan por este aprendizaje aprenden a través de juegos, modelos, prácticas o por casos reales. (https://estilosdeaprendizaje.org/aprendizaje-kinestesico/)

Las ponderaciones de los sub-atributos diferentes usuarios, estilos de aprendizaje, accesibilidad, granularidad, etc., son propuestas únicamente debido a que no se conoce cual sub-atributo es más o menos importante que otros. Sin embargo, estos valores pueden ir cambiando según aumente el número de mediciones. La medición por lo tanto es un agregado de los atributos que se quieran considerar.

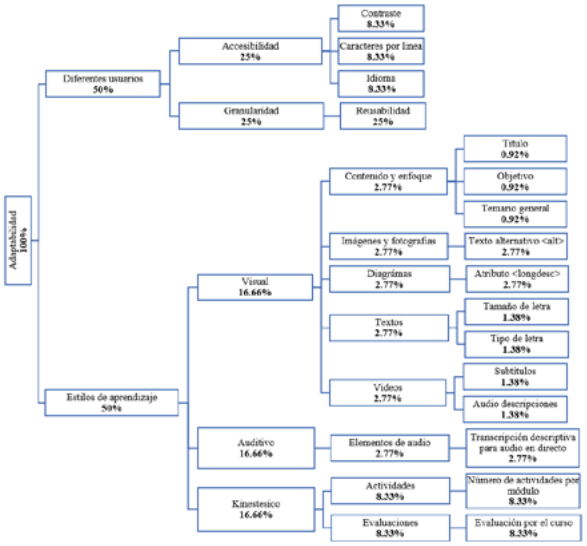


Fig. 3. Modelo desarrollado para adaptabilidad

Las ponderaciones de la Fig.3 se establecieron considerando el máximo valor de calidad en un atributo, es decir, un recurso es 100% adaptable si cumple con el 100% de los sub-atributos. La ponderación de los sub-atributos es una división simple del valor del atributo padre entre el número de sub-atributos. En la Tabla 1-12, se muestran las definiciones de los umbrales correspondientes al atributo de adaptabilidad únicamente, otros atributos como accesibilidad y granularidad no se consideran porque no son parte de la adaptabilidad. En la Tabla 1-12 los umbrales corresponden a los diferentes valores que el atributo puede tomar, por ejemplo, en Tabla 1 “texto negro sobre fondo blanco” corresponde al 8.33% del contraste, mientras que “texto azul sobre fondo negro” es un mal contraste y corresponde al 0% del 8.33%, es decir, no tiene calidad en el contraste.

Tabla 1. Umbrales de contraste

Texto azul sobre fondo negro	0
Texto verde sobre fondo blanco	0
Texto rojo sobre fondo negro	0.5
Texto rojo sobre fondo blanco	0.8
Texto negro sobre fondo blanco	1
Texto verde sobre fondo negro	1
Texto azul sobre fondo blanco	1

Tabla 2. Umbrales caracteres por línea

Mayor a 80	0
Menor a 80	1

Tabla 3. Umbrales identificación del idioma

Uno o dos idiomas (sin español, francés e inglés)	0
Un idioma (francés)	0.4
Un idioma (español)	0.5
Dos idiomas (español y francés)	0.6

ISSN en trámite

Un idioma (ingles)	0.6
Dos idiomas (inglés y francés)	0.7
Más de tres idiomas sin (ingles)	0.7
Dos idiomas (español e inglés)	0.8
Tres idiomas (español, inglés y francés)	1
Más de tres idiomas (incluidos español, francés e inglés)	1

Tabla 4. Umbrales de contenido y enfoque

Título, objetivo y temario general	1
Titulo y objetivo	0.8
Titulo y temario general	0.5
Titulo	0.3
Solo 1 elemento de los 3	0

Tabla 5. Umbrales de imágenes y fotografías

Texto alternativo	Sí	1
	No	0

Tabla 6. Umbrales para diagramas

Atributo longdesc	Sí	1
	No	0

Tabla 7. Umbrales tamaños de letra

Menor a 10	0
Mayor a 20	0
10 px	0.5
20 px	0.5
12 px	0.8
18 px	0.8
14 y 16 px	1

Tabla 8. Umbrales tipo de letra

Helvetica, Verdana y Arial	1
Trebouchet y Futura	0.8
Combinación de fuente aceptable y no aceptable	0.4
Otra	0

Tabla 9. Umbrales de video

Subtítulos y audio descripciones	1
Subtítulos	0.5
Audio descripción	0.5
Ninguno de los dos	0

Tabla 10. Umbrales de audio

Transcripción descriptiva de audio	Sí	1
	No	0

Tabla 11. Umbrales para actividades

1 actividad por cada módulo del recurso	Sí	1
	No	0

Tabla 12. Umbrales para evaluaciones

1 evaluación general del recurso	Sí	1
	No	0

4. TRABAJOS RELACIONADOS

Dada la problemática de que existen infinidad de recursos educativos en internet de libre acceso y otros que, aunque requieren una cuota de pago, no es posible saber si cumplen con los atributos de calidad que estableen las normas o estándares. La tabla 13 muestra los trabajos relevantes cuya principal diferencia con el trabajo aquí presentado es que es no describen lo que es medir cuantitativamente cualquier atributo.

Tabla 13. Trabajos relacionados

Enfoque	**Propone**	**Resultado**
Estándares y normas e-learning. (Hilera y Hoya, 2010)	Metodología que garantice los objetivos de accesibilidad, interoperabilidad, durabilidad y reutilización de los materiales didácticos.	Análisis de 101 estándares de los cuales determina que deben tener las siguientes características: Accesibilidad, Arquitectura, calidad, competencias, contenidos y evaluación, interoperabilidad, repositorios y metadatos.
Garantizar programas virtuales de alta calidad. (Suarez, Salinas y Czeszak, 2018)	Atributos esenciales como: Accesibilidad, adaptabilidad, usabilidad y modularidad	Determina que la usabilidad, accesibilidad, adaptabilidad y modularidad, son conceptos validados y compartidos a nivel internacional en base a e-learning.
La adaptabilidad y accesibilidad en los entornos de aprendizaje virtual. (Batanero, García E., García A. y Piedra, 2012)	Norma ISO/IEC 24751, tiene por objeto facilitar la búsqueda y uso del recurso más adecuado a cada usuario, a través de la definición de los metadatos de accesibilidad.	Considera tres aspectos relevantes para la norma: Recursos originales y adaptados. Modo de acceso Adaptabilidad
Norma UNE 71362: calidad en los materiales educativos digitales. (Fernández Pompillón,2017)	Descripción general de la norma, como están agrupados los 15 criterios de la norma para medir la calidad, determina cuales son los más importantes para que un material sea accesible para facilitar el aprendizaje.	Determina que la norma aporta un documento de referencia sobre la calidad de los materiales educativos digitales con un modelo y herramienta de evaluación que definen los fundamentos para evaluar la calidad. El fin último de la norma es facilitar e impulsar la creación, mejora y selección de material educativo digital de calidad.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Una vez que se analizaron todos los trabajos relacionados primeramente podemos determinar que es una tarea compleja definir y medir cuantitativamente atributos de calidad que deben tener los recursos de aprendizaje en cumplimiento a

ISSN en trámite

normas o estándares y que estos sean evaluados cuantitativamente sin depender de los usuarios o expertos antes de ser entregados al usuario final.

Se puede concluir que se logró el objetivo del trabajo al establecer las ponderaciones en los atributos y sub-atributos. Así mismo, se puede mencionar que de todos los atributos que se propusieron, actualmente los más mencionados son los de accesibilidad, reusabilidad y navegabilidad. Los menos trabajados son adaptabilidad, interactividad y robustez.

Se eligió el atributo adaptabilidad, ya que actualmente no hay ninguna investigación que nos diga como evaluar los recursos de aprendizaje que sean adaptables en contexto al usuario final.

A partir de todos los atributos analizados y al elegir el de adaptabilidad para evaluar los recursos de aprendizaje se encontró que en muchas investigaciones previas, para evaluar el recurso y determinar si es o no adaptable toman un grupo de alumnos o usuarios a los cuales se les proporciona cualquier recurso de aprendizaje y mediante test, encuestas, formularios, etc. se los proporcionan al usuario o al alumnos y ellos van calificando de acuerdo a su propio criterio lo que les pareció el recurso de aprendizaje, determinan si la mayoría prefirió un recurso visual que un textual o si hacían falta videos o audios. Por último, obtienen una calificación y asignan una ponderación al recurso. Lo que se pretende en esta investigación y como trabajo futuro, es generar la métrica y agregar otros atributos para calcular automáticamente el valor de adaptabilidad, sin depender de los usuarios.

REFERENCIAS

Aprendizaje auditivo. (s. f.). Estilos de aprendizaje. https://estilosdeaprendizaje.org/aprendizaje-auditivo/

Aprendizaje kinestésico. (s. f.). Estilos de aprendizaje. https://estilosdeaprendizaje.org/aprendizaje-kinestesico/

Bakaus, P. (s. f.). "*Imágenes adaptativas con srcset, sizes & heights*." AMP. https://amp.dev/es/documentation/guides-and-tutorials/develop/style_and_layout/art_direction/

Batanero, C., García, A., and Piedra, N. (2012) *"Norma ISO/IEC 24751: acceso para todos"* Madrid, España pp. 105-112

Carmona, E. J., & Rodríguez, E. (2017). *"Buenas prácticas en la educación superior*

virtual a partir de especificaciones de estándares e-Learning." Sofía, 13(1), 13-25. Obtenido de http://revistas.ugca.edu.co/index.php/sophia/issue/view/49

"Color y contraste." (s. f.). Universidad Complutense Madrid. https://biblioteca.ucm.es/edicionweb/contraste-y-color

Fernández-Pampillón, A., (2017) *"Calidad de los materiales educativos digitales"* Madrid, España, pp. 44-47, ISSN 2255-2111

Gomez, M. M. (2018, 24 de abril). "*5 recursos de aprendizaje para estudiantes*." e-learning Masters. http://elearningmasters.galileo.edu/2018/04/24/recursos-aprendizaje/

Guerrero, S., Ruíz Ma. P., Gutiérrez, I., Pérez, J., (2005) *"Adaptabilidad en los sistemas virtuales de formación"* pp. 54-59 Universidad de Oviedo

Hilera, J., Hoya, R., (2010) *"Estándares y normas e-learning"* ISBN: 978-84-693-0263-7, Universidad de Alcalá

Imágenes adaptables. (2021, 7 de julio). Mdn Web docs. https://developer.mozilla.org/es/docs/Learn/HTML/Multimedia_and_embedding/Responsive_images

Information technology - Learning, education and training - Quality management, assurance and metrics - Part 3: Reference methods and metrics. (2009, 1 de febrero). Engineering 360. https://standards.globalspec.com/std/1156828/iso-iec-19796-3

Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado. *"Evaluar Recursos Educativos".* https://intef.es/recursos-educativos/educacion-digital-de-calidad/une-71362/

Jimdo, (8 de febrero de 2019) *"Cómo elegir el mejor fondo para tu página web"* https://www.jimdo.com/es/blog/elegir-fondo-para-pagina-web/

Luján, S. (2006). *"¿Qué es la accesibilidad web?"* Universidad de Alicante. http://accesibilidadweb.dlsi.ua.es/

Menéndez, J., Nocedal, A., Corrochano, J., (2007) *"Estudio sobre la granularidad de objetos de aprendizaje almacenados en repositorios de libre acceso."* pp. 19-21 Bilboa, España

Prado, F., Rama, C., (2014) *"Los recursos de aprendizaje en la educación a distancia"* La campiña, Lima, Perú

Suárez, E., Salinas, E., Czeszak, W., (2018) *"Garantizar programas virtuales de alta calidad."* pp. 1-15

W3C. (s. f.). *"Evaluación de la accesibilidad web Visión general."* W3C Web Accessibility. https://www.w3.org/WAI/test-evaluate/

ISSN en trámite

Etapas de Desarrollo del Repositorio Digital en el TecNM Campus Cuautla

Víctor Manuel Ayala Lara* Mónica Leticia Acosta Miranda**
Ernesto de la Cruz Nicolás* Jesús Hazael Jiménez Barrera******
Kevin Manuel Victoria Rodríguez*** Hugo Armando Rodríguez Villalba******

** Estudiante de la Maestría en Ingeniería Administrativa y Jefe del Centro de Cómputo m20680027@cuautla.tecnm.mx. ** Coordinadora de Posgrado monica.acosta@cuautla.tecnm.mx. *** Docente de tiempo completo ernesto.delacruz@cuautla.tecnm.mx). **** 15680172@cuautla.tecnm.mx), ***** 17680244@cuautla.tecnm.mx ****** 17680215@cuautla.tecnm.mx Estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales*

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla, Libramiento Cuautla - Oaxaca, S/N, Col. Juan Morales, Yecapixtla, Morelos, México C. P. 62826.

Resumen: El proceso de implementación del Repositorio Digital en el TecNM Campus Cuautla, pasó por diversas etapas de desarrollo como fueron un modelado mediante la Metodología UI/UX como herramientas de diseño, la Reusabilidad de Software mediante DSpace, GitHub, Estilos Figma, entre otras herramientas más de ambientes digitales para diseño, desarrollo e implementación. En la presente publicación se muestran los resultados obtenidos de cada una de las etapas principales como son: Diseño con la Metodología UI/UX, Desarrollo del Back-End con DSpace y Desarrollo del Front-End para generar las vistas obtenidas desde el Diseño. Todo esto con el objetivo de que la institución cuente con una herramienta que permita reunir, preservar y difundir la producción científica y académica generada por estudiantes u docentes del plantel, sirviendo como un espacio que de visibilidad y permita el intercambio de información, aumentando el impacto de los trabajos realizados y de la institución.

Keywords: Metodología UX, DSpace, Back-End, Front-End, Estilos Figma, JSPUI.

1. INTRODUCCIÓN

La popularidad de Internet a principios de los años 90 provocó un importante aumento en el intercambio de información de diversos tipos. Los autores e investigadores de las Instituciones de Educación Superior (IES) fueron de las primeras personas en utilizar este nuevo entorno para intercambiar ideas y datos de una manera más ágil y con menores costos, creando el archivo abierto (OA) en 1991, "dónde los físicos depositaban sus trabajos preliminares para ser leídos y comentados por los colegas que lo deseen" (Keefer, 2017).

Los repositorios digitales se han diseñado don la intención de asegurar la preservación de los contenidos que nacen día con día, no sólo en los soportes tradicionales o en ambientes digitales, sino en todos los nuevos soportes por medio de cuales la sociedad puede generar conocimiento. Por otra parte, la generación de contenidos aumenta día con día, en relación con la cantidad de personas que tienen acceso a Internet, lo que coloca a los repositorios en una carrera con el tiempo (Vega Armijo & Cardoso, 2015).

La razón por la cual los repositorios digitales han ido en aumento, sobre todo en las IES, es por la diversidad de información que puede almacenarse en ellos como: Artículos científicos, artículos académicos, tesis, libros y capítulos de libros, proyectos de investigación, conferencias y congresos, trabajos finales de cursos, entre una gran variedad de información en diversos formatos; que en caso de intentar hacerla llegar a la comunidad educativa y científica por los medios tradicionales de impresión y edición se convierte en un proceso largo y costoso que, por otra parte, tiene sus implicaciones ecológicas.

La comunidad del Instituto Tecnológico de Cuautla (ITC), como todas aquellas comunidades académicas de nivel superior, desarrollan, como parte de sus actividades académicas y de investigación científica, diversos productos como artículos o informes de investigación que requieren ser difundidos y puestos a disposición de cualquier persona interesada en ellos para lograr el impacto debido. Esta es la razón de ser del Repositorio Digital Institucional del Tecnológico de Cuautla: Reunir, preservar y difundir la producción académica y científica de la institución, mostrando al interior y exterior la actividad intelectual que se ha venido realizando, potenciando y/o promoviendo la creación, la difusión y el uso del conocimiento generado por la comunidad académica.

ISSN en trámite

Para el desarrollo e implementación del Repositorio digital del I.T.C. se utilizaron diversas metodologías que se describen a continuación.

1.1 Diseño con la Metodología UX

Crear un repositorio digital requiere de un arduo trabajo, para lo cual es necesario dividirlo en etapas. Como etapa inicial se hizo necesaria la investigación, con el fin de analizar el material con el que cuenta la institución (hardware) y definir que software y tecnologías son las más adecuadas para el desarrollo del Repositorio Digital. Esta etapa abarca una parte del modelado, así como todo el proceso de desarrollo del diseño del producto digital.

En este caso se realizó una investigación de diseño profunda utilizando Diseño Centrado en el Usuario, para poder lograr un diseño que no solo sea agradable, si no que esté construido de la mano de los usuarios finales en la mayor parte del proceso de este producto digital, con la intención de conocer mejor cuáles son sus problemas, necesidades, metas y los resultados que se espera obtener con el producto, en comparación con otros Repositorios Digitales que no están diseñados ni construidos pensando en el usuario. Este proceso de diseño involucra temas de accesibilidad, heurísticas de diseño y leyes de UX para que este producto sea accesible y usable.

La metodología UX se basa en obtener datos confiables respecto al comportamiento y necesidades de los usuarios potenciales de una interfaz. Su objetivo es contar con las herramientas que permitan diseñar plataformas fáciles de usar, comprensibles y que solucionen la problemática de los usuarios (Uhlein, 2021), razón por la que se decidió emplearla.

1.2 Desarrollo del Back-End con DSpace

La siguiente etapa tiene como objetivo implementar el repositorio digital de contenidos científicos y tecnológicos mediante la herramienta DSpace en un servidor Debian con acceso a internet, lo que permite el almacenamiento de contenido digital científico, académico y de vinculación con los docentes y estudiantes, principalmente de posgrado, pertenecientes a la Institución.

En la actualidad el uso de herramientas para la administración de repositorios digitales permite un mayor alcance para las personas con las cuales se puede compartir el contenido de la investigación, dado que estas tecnologías son herramientas que le permiten a una institución competir eficazmente, tener información relevante y disponible desde cualquier lugar o momento en que se necesite, siendo elementos claves para hacer que la comunidad crezca, por lo que su uso logra importantes mejoras al permitir compartir investigaciones ya realizadas y suministrar información oportuna para nuevas investigaciones.

1.3 Desarrollo del Front-End para generar las vistas.

El Front-End es una herramienta que facilita desde la organización de la misma información o recursos que se puedan disponer así mismo creando un nuevo impacto a partir del momento en que se empiece a formar una producción y como una herramienta planeada y creada para poder satisfacer las necesidades del momento.

En la actualidad el uso masivo de las Tecnologías permite una mayor capacidad en los procesos de gestión, por lo cual se ha facilitado la forma de organizar las actividades. Dado que estas tecnologías son herramientas que permiten competir eficazmente, tener información relevante y disponible desde cualquier lugar o momento en que se necesite, siendo elementos claves para hacer que el trabajo sea más productivo por lo que su uso logra importantes mejoras al permitir automatizar procesos tanto administrativos como operativos y suministrar información oportuna para la toma de decisiones.

2. PROCEDIMIENTO Y ETAPAS DE DESARROLLO

En general todo el procedimiento que se llevó a cabo para el desarrollo del Repositorio Digital del I. T. C. fue bajo las siguientes etapas: Diseño bajo la metodología UX, Desarrollo del Back-End y Desarrollo del Front-End. A continuación, se describen y muestran los productos terminados del proyecto de Investigación.

2.1 UX Research

El primer proceso que se realizó, fue hacer en Figma un BenchMarking de Repositorios Digitales Institucionales de Universidades grandes como la UNAM, el IPN, el Instituto Tecnológico de Colima, la UAEMex y la Universidad Torcuato Di Tella. El BenchMarking que se desarrollo fue para conocer como estas Instituciones implementaban sus repositorios digitales, se analizó sus funcionalidades y las desventajas que solían tener cada uno de los repositorios, cuatro de estas instituciones universitarias utilizaban DSpace y las otras dos tenían su propia implementación; como se muestra en la Ilustración 1 “Benchmarking de Repositorios Digitales Institucionales”



Ilustración 1 Benchmarking de Repositorios Digitales Institucionales

Fuente: Elaboración Propia.

ISSN en trámite

El siguiente proceso que se realizo fue la creación de proto-personas (ver Ilustración 2 Proto-personas del Repositorio Digital Institucional) que son arquetipos de los usuarios con los conocimientos básicos que se tienen o la abstracción que se le da a estos perfiles, los perfiles que estamos abstrayendo en esta ocasión son: Alumno de Licenciatura, Alumno de Maestría y Docente. Estos documentos se crearon usando la herramienta UXPressia.

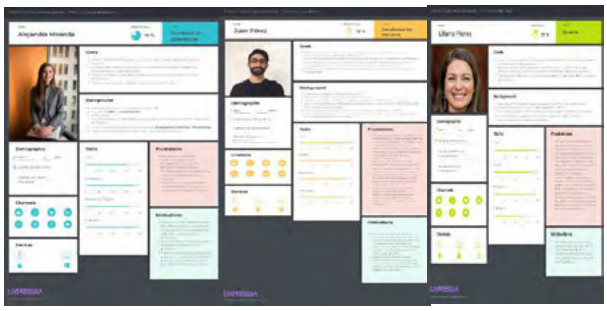


Ilustración 2 Proto-personas del Repositorio Digital Institucional

Fuente: Elaboración Propia.

En esta etapa se usó la metodología de User Center Design para enfocarse en el usuario final y el producto digital que se entregará, lo que permite construirlo con base a los problemas que tiene el usuario buscando que se resuelvan mediante el producto.

La etapa del UX Research es una de las más largas en cuestión de tiempo y procesos, pero es fundamental y de gran importancia para lograr a un producto exitoso.

Para obtener información, se realizaron entrevistas y, posteriormente, se organizaron todos los datos obtenidos para usarlos en los procesos de **Customer Journey Map** entre otros. Todos estos documentos se realizaron mediante la herramienta Miro; como se muestra en la Ilustración 3 "Customer Journey Map (CJM)"



Ilustración 3 Customer Journey Map

Fuente: Elaboración Propia.

Considerando que:

> "Los procesos de publicación científica se ven obligados a renovarse al incorporar tecnologías de información y favorecer la presencia del conocimiento en redes de información interconectadas y visibles para todo el mundo. Los componentes tecnológicos disponibles para el acceso abierto, como son los repositorios, deben evolucionar de acuerdo con las demandas de sus usuarios potenciales y por ello es necesario añadir nuevas mejoras en su imagen o apariencia, incrementar sus funcionalidades, mejorar su eficiencia, entre otras, lo cual se logra a través de implementar pequeñas innovaciones incrementales" (González Peréz, Ramírez Montoya, & García Peñalvo, 2019).

De acuerdo a lo anterior, para el desarrollo, publicación, difusión y principalmente divulgación de la producción academica, tecnologica y de vinculación; es necesario incorporar tecnologias diversas para favorecer y, sobre todo, gestionar la información para el tratado de redes de conocimiento en el mundo.

Por ello la guía de estilos es muy similar al Sistema de Diseño, ya que cuenta con muchos elementos de cada apartado, solo que en este archivo es, en ocasiones, limitada la información dependiendo la sección o agrega ejemplos de cómo utilizar correctamente la tipografía, los colores, los layouts, los espacios, el tamaño de los iconos, etc. como se muestra en la Ilustración 4 "Guía de Estilos"

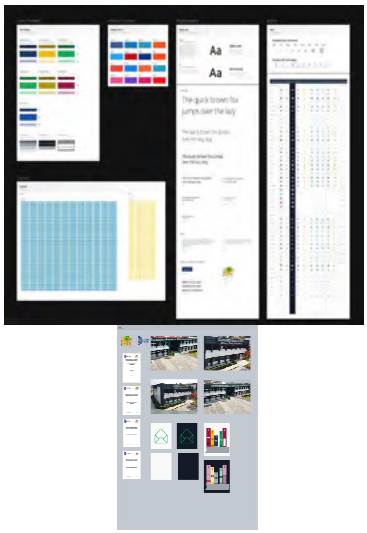


Ilustración 4 "Guías de Estilos"

Fuente: Elaboración Propia

La idea principal de utilizar esta metodología es sistematizar bien los componentes, haciéndolos reutilizables y modificables al momento de utilizarlos en la creación de las interfaces graficas. Por otra parte, es un excelente entregable para los programadores, ya que ellos pueden utilizar los componentes ya

ISSN en trámite

diseñados y replicar la metodología para el desarrollo del sistema. Esto podría resultar de gran ayuda en cuestión de tiempos de desarrollo, como se muestra en la Ilustración 3 “Componentes de la Guía de Estilos”.



Ilustración 1 Componentes de la Guía de Estilos
Fuente: Elaboración Propia

2.2 Desarrollo Back-End configuración de servidor y Dspace

Para el diseño y puesta en funcionamiento del repositorio Digital del Tecnológico de Cuautla, se utilizó un servidor con las siguientes características: Marca Dell EMC, Modelo PowerEdge R640 con Procesador Intel Xeon de 2.a generación, 16 GB de Memoria RAM y Disco Duro: 1 TB. Respecto al Sistema Operativo: Debian 10 Buster, Aplicación de Escritorio GNOME 3.30 y Versión de Linux: 4.19 (Ilustración 4).

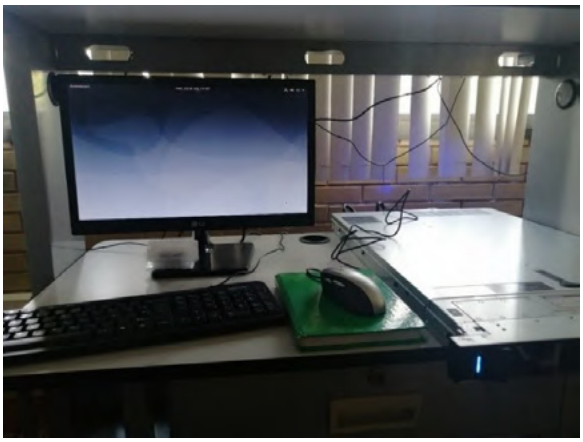


Ilustración 2 Servidor con el Sistema Operativo Debian 10 Buster instalado

Fuente: Elaboración propia.

Para configurar la salida a internet se configuró una dirección IP estática al servidor desde el archivo de red. La dirección IP asignada al servidor es una IP pública homologada y fue proporcionada por el jefe del Centro de Cómputo y responsable del servidor.

En el caso de la instalación y configuración del DSpace fue necesario instalar y configurar un conjunto de herramientas previas como: JDK en la versión Open JDK 8, Apache Maven en la versión 3.6.0, PostgreSQL en la versión 13.4. Una vez preparados los requisitos necesarios en el servidor, se creó un directorio de instalación y posterior a eso se realizó la instalación del software DSpace versión 6.x. Lo anterior se muestra en la Ilustración 5, resultados de la Instalación y configuración.

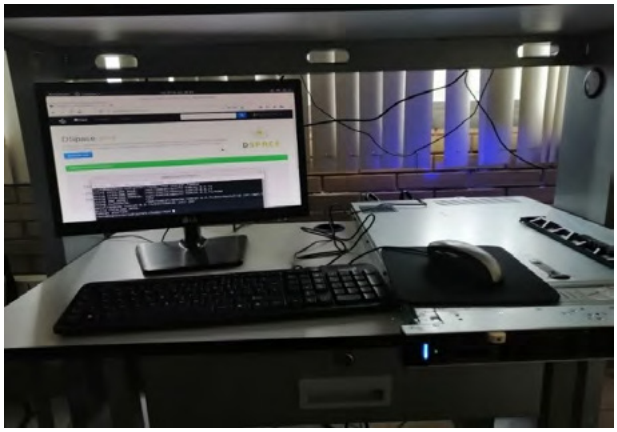


Ilustración 3 Instalación y configuración del DSpace
Fuente: Elaboración Propia

DSpace es un sistema de biblioteca digital diseñado para capturar, almacenar, ordenar, conservar y redistribuir la producción intelectual y de investigación de una Universidad en formato digital. Desarrollado conjuntamente por HP Labs y MIT Libraries (Barton & Waters, 2005).

2.3 Desarrollo del Front-End para generar las vistas obtenidas del Diseño

Por el tipo de sistemas y guías de diseño que se tienen actualmente, es necesario transferir y adaptar todo ese diseño de la metodología UX a una interfaz web con tecnología como HTML5 y CSS3.

DSpace ofrece interfaces de usuario de una versión estándar de la aplicación web de este. En este caso, se hará uso de la interfaz JSPUI, como se muestra en la Ilustración 6, la cual es una interfaz estándar basada en JSP, compilada con Bootstrap cas. Teniendo en cuenta estos puntos, la administración y adaptación con el cual funciona la interfaz JSPUI y las guías de estilos, se logra hacer la adaptación adecuada de la interfaz web de nuestro repositorio digital.

ISSN en trámite

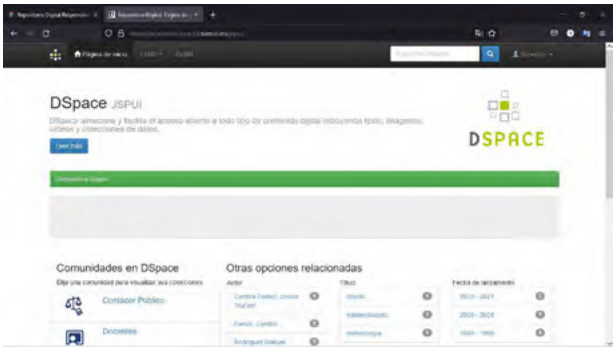


Ilustración 4 Vista con DSpace y JSPUI
Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, se realizó un análisis profundo de la forma de trabajo interno de DSpace en la obtención de datos, el modelo de los componentes y como es la estructura final al usuario. La Ilustración 7 plasma lo mencionado ya que de ahí se tomaron en cuentas muchos diseños posteriores del proyecto.

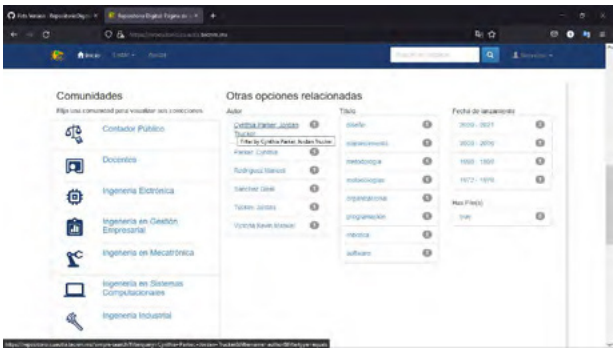


Ilustración 5 Modelado DSpace
Fuente: Elaboración Propia

Figma. Se familiariza con los componentes, secciones, tipografías, colores y todo lo que conlleva la guía de estilos para así poder el uso apropiado de cada recurso ya que es de suma importancia cada uno de ellos. La página principal del proyecto en Figma es como se muestra en la Ilustración 8 Guía de Estilos Figma empezando en la page de guía de estilos.

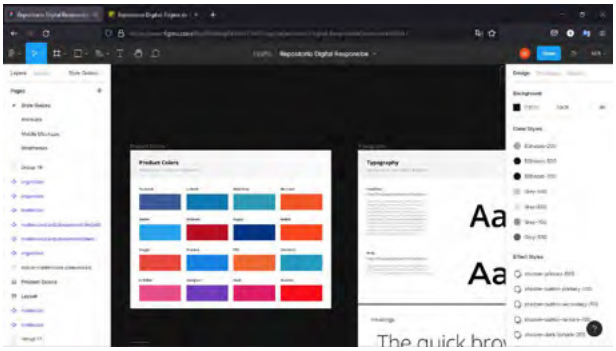


Ilustración 8 Guía de Estilos en Figma
Fuente: Elaboración Propia

En la sección de imágenes del proyecto se lleva un proceso diferente. Son imágenes oficiales para ser utilizadas, son renderizadas con la mejor calidad. Se ocupan los logos oficiales del ITC Cuautla y del Tecnológico Nacional de México. La portada de un preview de los documentos en el área de normatividad del repositorio y por ultimo los gifs que se llevan a cabo en un proceso dentro del repositorio como se aprecia en la Ilustración 9 Imágenes Oficiales que en este último caso son proporcionados los recursos ya sea cual sea el modo en que se encuentra el repositorio.



Ilustración 9 Imágenes Oficiales
Fuente: Elaboración Propia

El navegador brinda una gran herramienta para poder ir redimensionando la parte de la vista y así ir poder viendo los cambios dentro de la parte adaptativa del proyecto, como se sea mencionado esta parte se trabaja para los dispositivos móviles y se hizo uso como se muestra en la Ilustración 10 en la parte de lo responsivo sea 414px el ancho del dispositivo.

ISSN en trámite

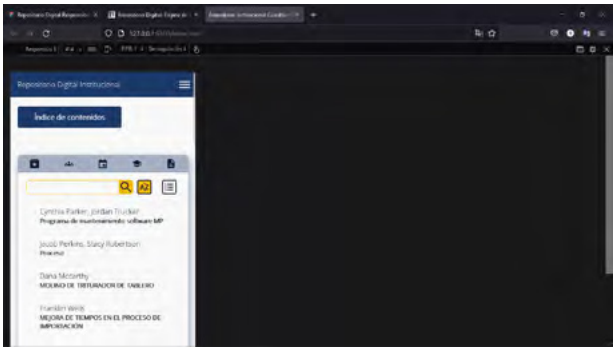


Ilustración 10 Visualización de 414px de ancho
Fuente: Elaboración Propia

Realizar un testeo general entre el usuario en la interfaz web, donde se probará la navegación, interacción, función y aprobación por parte del mismo usuario también para mención de posibles cambios o corrección de errores que permite tener procesos de ejecución de un programa o aplicación y una metodología de trabajo con el objetivo de localizar errores de software. También puede describirse como el proceso de validación y verificación de un programa de software o una aplicación. Visualizar la interfaz realizada en la parte de la adaptabilidad en los diferentes navegadores y en la resolución en los diferentes dispositivos como en la Ilustración 11 se puede observar la página principal del proyecto en modo de escritorio.

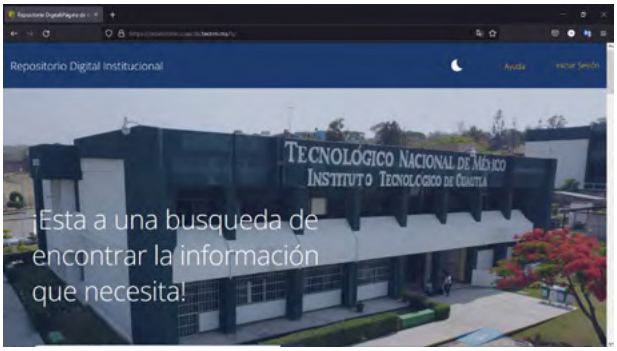


Ilustración 11 Vista Principal en el Test
Fuente: Elaboración Propia

La función del testeo es muy importante por ello la comprobación de posibles errores del proyecto como funcionalidades se determinan mediante diferentes navegadores, lo cual es cuando entra la parte de la compatibilidad en navegadores y dispositivos. En la Ilustración 12 en la cual se nota que es otra sección dentro del mismo proyecto.

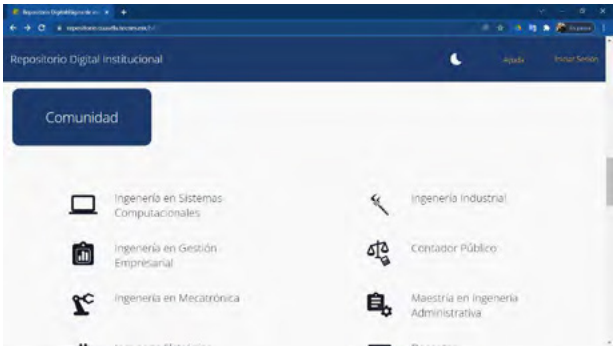


Ilustración 12 Vista Comunidad en el Test
Fuente: Elaboración Propia

6. CONCLUSIONES

La primera etapa de este proyecto fue una de las más importantes ya que se refiere al "análisis o requerimientos de un sistema". En esta parte lo que se realizó fue la investigación de los recursos y el hardware con los que se contaba en la institución. Posteriormente se definieron las características del servidor para instalar el repositorio digital. Tomando en cuenta dichas características se realizó una tabla de tecnologías y software a utilizar para el desarrollo tanto del Backend (lado del servidor) como en el Frontend (lado del cliente).

Se puede concluir que en la etapa del Back-End de la configuración del servidor y DSpace se realizó con éxito, pues se ha desarrollado el repositorio digital el cual permite el almacenamiento de contenidos de producción científica y académica que permite vincular a los docentes y estudiantes, principalmente de posgrado, del TecNM campus Cuautla.

Contar con esta herramienta en la institución genera beneficios a estudiantes, docentes, público en general y al campus mismo, ya que proporciona visibilidad a los trabajos realizados en la institución con un mayor impacto, aumento de citas de los autores y las publicaciones; es un acceso permanente de la información que permite la fácil recuperación de los contenidos y, al mismo tiempo, garantiza la preservación de los resultados de las investigaciones realizadas permitiendo la continuidad de los trabajos ya sea al interior de la institución o mediante la creación de redes de investigación. Con todo ello, también se incrementa la visibilidad de la institución generando una ventaja competitiva.

El estar diseñado el proyecto con la metodología de User Center Design facilita su adaptación a diversos fines o usos como puede: ser el manejo de archivos de clientes de profesionistas independientes, la documentación de las empresas, etc., permitiendo su comercialización, ya que el modelo de negocio resulta funcional para la digitalización de archivos y expedientes, en una ruta verde y de desarrollo sustentable, que permite controlar el acceso a la información,

ISSN en trámite

con las mismas etapas de diseño y desarrollo para lograr un proyecto a la medida de las necesidades del cliente.

REFERENCES

Barton, M. R., & Waters, M. M. (2005). *Cómo crear un Repositorio Institucional.* The Cambridge-MIT Institute (CMI), MIT Libraries. Massachusetts: The Cambridge-MIT Institute (CMI). Recuperado el 28 de Febrero de 2022, de https://www.recolecta.fecyt.es/sites/default/files/contenido/documentos/mit.pdf

González Peréz, L. I., Ramírez Montoya, M. S., & García Peñalvo, F. J. (21 de Marzo de 2019). Modelo de evaluación de experiencia de usuario para Repositorios Institucionales. (GRIAL, Ed.) *Grupo GRIAL, 1*(9), 22. doi:10.5281/zenodo.2602024

Keefer, A. (2017). Los repositorios digitales universitarios y los autores. *ANALES DE DOCUMENTACION*(10), 205-214. Obtenido de https://revistas.um.es/analesdoc/article/view/1151

Uhlein, V. (22 de Septiembre de 2021). *Por qué poner en marcha un proyecto UX research*. Obtenido de UNIR: https://www.unir.net/ingenieria/revista/ux-research/

Vega Armijo, M., & Cardoso, E. (2015). *Repositorios digitales históricos, ¿nueva memoria de la humanidad?* Obtenido de Instituto de Investigaciones Bibliotecológicas y de la Información, UNAM: https://repositorio.unam.mx/contenidos/repositorios-digitales-historicos-nueva-memoria-de-la-humanidad-5002972?c=J6N7bW&d=false&q=*:*&i=2&v=1&t=search_1&as=4

ISSN en trámite

Modelo para la detección de anomalías en el comportamiento de una persona

Gloria Vanessa Urquiza Flores, Raúl Pinto Elías *

Departamento de Ciencias Computacionales
Tecnológico Nacional de México/CENIDET
{m20ce089, raul.pe}@cenidet.tecnm.mx

Resumen: El reconocimiento de actividad humana HAR (Human Activity Recognition) es un área de investigación activa, el interés por desarrollar esta área se debe a su amplia variedad de aplicaciones en el mundo real como, en la videovigilancia, seguridad, deporte, atención médica, vida asistida y monitoreo continuo en el hogar. El HAR es un tema relacionado con el análisis del comportamiento humano con gran trayectoria de investigación, mayormente enfocado al comportamiento individual de un ser humano, monitoreando el comportamiento de una persona. En el presente artículo se propone el desarrollo de un modelo multimodal utilizando cámaras RGB, acelerómetro y giroscopio. Mediante la observación de lo que suele hacer una persona durante una rutina durante un periodo establecido, el modelo podrá utilizar su conocimiento aprendido para monitorear la rutina actual de la persona y detectar si existe alguna desviación de los patrones de actividad normales.

Palabras clave: Actividad humana, patrón de comportamiento, patrón anómalo.

1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento automático de actividades físicas es conocido como Reconocimiento de Actividad Humana HAR, su objetivo es el estudio y modelado de los movimientos que provienen del cuerpo humano, al realizar una actividad (J. Thummala, 2020). El HAR está desarrollado para aplicaciones como, la atención médica (M. Skubic, 2015), vida asistida (Mettel, M., 2019), vigilancia (M. K. Hossen, 2016), seguridad, deporte, entre otras.

Se utilizan métodos que implementan sensores para monitorear a los seres humanos y sus actividades diarias. Aunque cada sensor tiene ventajas y desventajas significativas, usar un solo tipo de sensor para monitorear actividades, ha demostrado ser insuficiente para caracterizar una amplia variedad de actividades físicas humanas.

El reconocimiento de actividades humanas está relacionado con el análisis de comportamiento humano, en la gran mayoría de estos sistemas, se enfocan en monitorear el comportamiento individual de una persona. Se realiza el procesamiento de secuencias de imágenes o videos en entornos controlados con el objetivo de obtener un modelo de comportamiento.

En el área de HAR existe un enfoque en el desarrollo de tecnología, que permita la evaluación continua de los cambios basados en el comportamiento y los patrones de actividad de un individuo, con el objetivo de determinar la existencia de cambios en el diario vivir de un ser humano.

La principal aportación de este artículo, es el desarrollo de un sistema multimodal utilizando los sensores cámaras RGB, acelerómetro y giroscopio. El escenario para el sistema son cuatro habitaciones controladas de un hogar y la caracterización de 16 actividades de la vida diaria para realizar el reconocimiento de patrones anómalos en el comportamiento de una sola persona.

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección dos se presenta el estado del arte, 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 detalla la experimentación y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, se presenta la sección de conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE

Se realizó un análisis de las investigaciones existentes en el área HAR, el estado del arte de esta investigación involucra sistemas que realizan, el reconocimiento de actividad humana, implementación de sensores portátiles, sistemas multimodales, análisis y modelado de comportamiento humano.

Un sistema (A. F. Bobick, 2001) realiza el reconocimiento de actividad, mediante la resta de plantillas temporales. Se utiliza una plantilla de imagen vectorial, generando una imagen de

ISSN en trámite

energía de movimiento (MEI) y una imagen historial de movimiento (MHI). Para la clasificación, las plantillas se comparan con modelos almacenados de acciones conocidas, se logra el reconocimiento de 18 ejercicios aeróbicos.

Para detectar el cuerpo humano (M. Babiker,2007), se utiliza la resta de fondo 2D, en un sistema de vigilancia inteligente, con la estimación de un cuadro delimitador, se rastrea el cuerpo y se realiza el reconocimiento del tipo de movimiento y actividad humana, se reconoce las actividades: caminar, sentarse, boxear, agitar las manos y colocar.

Para el reconocimiento de caídas en adultos mayores (J. Thummala,2020), el sistema utiliza cámaras RGB en la pared de una habitación, para analizar la forma humana, se realiza la resta de fondo y se calcula una elipse aproximada que, proporciona la orientación de la persona, al discriminar una caída de otra actividad normal, se identifica si ha ocurrido un gran movimiento y se calcula el cambio en la forma humana, si se detecta una elipse inmóvil, entonces la caída es confirmada por el sistema.

Una aplicación de gimnasio (Ganesh,2020), realiza el registro de actividades deportivas como flexiones, sentadillas, planchas, estocada hacia adelante y abdominales. Se utiliza una cámara RGB y se calcula la estimación de la postura del cuerpo humano, usando el modelo *Open Pose*, se desarrolló un contador de repeticiones, se divide según mínimos locales y se calcula la correlación para cada punto esquelético.

Se ejecuta la detección de posturas corporales, proporcionadas por *Microsoft Kinect®,* se identifican características de interés centrándose en partes importantes como la cabeza, el cuello, el torso, los brazos, las piernas, las manos y los pies. La clasificación de actividad, es considerada como una secuencia de diferentes configuraciones de articulaciones y para eso es necesario un análisis de la postura y un procedimiento de clasificación. En (S. Gaglio, 2015), se logra la clasificación de actividades como patada lateral, palmada, coger la tapa, caminar, sentarse y levantarse.

Con el avance de la tecnología y solucionando problemas existentes en el área de visión por computadora, se han desarrollado sistemas (Zhen-Yu He,2008), que utilizan datos de sensores como el acelerómetro utilizado en el bolsillo del pantalón de una persona, para establecer un modelo y reconocer cuatro actividades correr, estar quieto, saltar y caminar.

El uso de sensores para realizar HAR, ha abierto campos de investigación que implementan el uso de más de un único sensor, en un sistema de reconocimiento (U. Maurer, 2006), para el monitoreo, son utilizados seis dispositivos *eWatch* en diferentes posiciones corporales, que recopilan datos generados del acelerómetro y el sensor de luz, se reconoce actividades ambulatorias como caminar, subir y bajar escaleras

Otro es Centinela (Lara,2012), un sistema basado en aceleración y señales fisiológicas para, reconocer automáticamente actividades físicas como correr, sentarse, ascender y descender, solo requiere un dispositivo sensor y un teléfono móvil y recopila datos de aceleración y signos vitales.

En el área del análisis y comportamiento humano existen investigaciones (M. Pavel, 2015), enfocados en sistemas que, realicen la identificación de anomalías en el comportamiento de una persona, mediante el reconocimiento de actividades de la vida diaria, sistemas para la atención a la salud, medicina y vida asistida.

El HAR también podrá reconocer anomalías y eventos adversos o comportamientos desviados a los habituales, si se adquiere el reconocimiento de actividades que proporcionen información útil, para generar un patrón de comportamiento.

Un sistema de monitoreo continuo (M. Skubic,2015) y discreto en el hogar, utiliza sensores integrados en el entorno para recopilar patrones de comportamiento y actividad, a fin de detectar cambios en la salud, enfocándose en los adultos mayores.

Nuestro estado del arte está conformado por investigaciones que permiten enriquecer el conocimiento en el área HAR, inicialmente en la caracterización de las actividades diarias haciendo uso de dispositivos sensores, además de estar conformado por investigaciones para el reconocimiento de anomalías en el comportamiento de una persona, siendo de interés el enfoque y la metodología que implementan.

3. RECONOCIMIENTO DE ACTIVIDAD HUMANA

La clasificación de acciones simples y complejas implica determinar qué acción es la que aparece en un flujo de datos. Se han propuesto diferentes taxonomías, sin embargo (M.Poppe, R,2010), adopta la siguiente jerarquía:

1.Acción primitiva: movimiento atómico que puede describirse con respecto a una parte del cuerpo, por ejemplo, pierna izquierda hacia adelante es una acción primitiva.

2.Acción: consta de acciones primitivas y describe un movimiento de cuerpo entero, correr es un ejemplo de acción.
3.Actividad: contiene una serie de acciones posteriores y dan una interpretación del movimiento que se está realizando, por ejemplo, saltar obstáculos es una actividad que contiene acciones de caminar, saltar y correr.

3.1 *Visión por computadora*

Para el ser humano, el reconocimiento de actividad se considera una habilidad natural. Tratar de emular este tipo de habilidad en sistemas de detección automático se considera un gran desafío. Un enfoque común es el uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión por computador. Dentro de sus campos de estudio, se encarga de analizar, procesar y sobre todo entender la información contenida en imágenes o videos del mundo real a través de diferentes técnicas (Vishwakarma, S et al., 2012). Estas técnicas utilizan procedimientos de segmentación de imagen y extracción de características.

ISSN en trámite

3.2 *Estimación de la pose humana*

La estimación de la pose humana (*Human Pose Estimation*) es el proceso de predecir las posiciones 2D o 3D de cada una de las partes del cuerpo de una o varias personas que se encuentren presentes en imágenes o videos (Cao et al., 2016). Los métodos de estimación pueden procesar videos y transformar la información numérica y simbólica para entender el contenido de la imagen, obteniendo como resultado la configuración espacial de las partes del cuerpo humano, de una variedad de modelos para la estimación humana.

3.3 Análisis del comportamiento

El HAR está desempeñando un papel central al ofrecer el desarrollo de entornos más interactivos y cognitivos (Vaňuš, J et al., 2017). Es un campo de investigación activo, en el que se desarrollan métodos para comprender el comportamiento humano, mediante la interpretación de atributos derivados del movimiento, la ubicación, las señales fisiológicas y la información ambiental. Para el desarrollo de tecnología, que permita modelar el comportamiento humano, se debe seleccionar sensores portátiles, métodos de aprendizaje automático y métricas de evaluación, que permitan realizar el monitoreo de las actividades realizadas por una persona, en el día a día y a largo plazo.

3.*4 Detección de anomalía*

En el área de reconocimiento, existe un mayor enfoque en el desarrollo de tecnología que permita, la evaluación continua de cambios basados en los patrones de actividad de un individuo bajo estudio, con el objetivo de determinar la existencia de cambios en el diario vivir de un ser humano. Los sistemas para la detección de anomalías en el comportamiento, recopilan datos de actividades durante un periodo y se obtiene un patrón que se considera normal, el objetivo es, detectar cuando exista una anomalía en el comportamiento estudiado, donde la anomalía se define como una desviación de lo común, eventos que ocurren raramente o no son esperados (Yin, J et al., 2008).

La anormalidad y normalidad son conceptos difíciles de separar, encontrar el límite que separa a uno del otro sigue siendo difuso. En el caso los conceptos de anormalidad y normalidad bajo el contexto de esta investigación, un comportamiento "normal" indicaría que una persona realiza actividades de la vida diaria de manera habitual en su propia rutina. Un comportamiento "anormal" indicaría que existe "una desviación con respecto a algo" para este modelo, la desviación se detecta con respecto a la rutina de la persona.

3.5 *Sensores*

Existe una línea de investigación activa, por realizar la detección automática, reconocimiento y análisis de acciones humanas a partir de datos obtenidos de sensores. Un sensor es un dispositivo que permite la transducción de cualquier magnitud física o química en una señal eléctrica, aprovechando las propiedades eléctricas de la materia. Usualmente, los dispositivos utilizados para el registro de actividades físicas son sensores de movimiento (Nweke, H et al., 2019). Los sensores más comunes para el monitoreo de actividades humanas son los acelerómetros, giroscopios, unidades de masa inercial.

4. SISTEMA PROPUESTO

El sistema propuesto se diseñó para aprender y construir un modelo para la detección de anomalías en el comportamiento de una persona, el diagrama general se muestra en la Figura 1. El sistema fue implementado en un entorno de hogar, la metodología utilizada fue:

1. Adquirir videos de cuatro cámaras RGB.
2. Realizar la detección de objetos en video.
3. Realizar la localización de una persona y grabar video.
4. Adquirir datos del sensor acelerómetro y sensor giroscopio.
5. Realizar la estimación de la pose humana.
6. Realizar el cálculo de medida de proximidad.
7. Obtener la caracterización de actividades.
8. Obtener el recorrido del grafo.
9. Introducir el patrón a la máquina de estado finito.

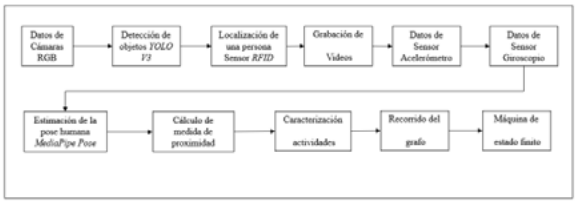


Fig.1 Descripción general del sistema

Cámara RGB: Cuatro cámaras RGB son distribuidas en cuatro habitaciones de un hogar, cocina, comedor, sala de estar y dormitorio. Las cámaras utilizadas son de la marca Dahua, modelo DH – IPC – HFW1431SN – 02808 – S4, resolución HD 720 (1280×720), 30 FPS.

Detección de objetos *YOLO V3:* En la detección de objetos con el sistema *YOLO V3* se está implementando un modelo previamente entrenado, con una lista de 80 clases de objetos que el modelo podrá detectar. Para esta investigación se considera únicamente la información de la detección de los siguientes objetos que se almacena y guarda su configuración en cada una de las habitaciones:

- Cocina: Refrigerador, lavaplatos, estufa.
- Comedor: Mesa, silla, horno de microondas.
- Sala de estar: TV, 2 sofá.
- Dormitorio: Mesa, silla, Laptop.

ISSN en trámite

En el caso dónde el objeto no fue identificado por YOLO V3, se realizó un etiquetado manual del objeto, como en los siguientes casos: en la cocina se etiquetó una puerta de acceso al jardín y mesa, en la sala de estar una puerta, en el comedor un frutero y en el dormitorio un tocador de belleza.

Sensor *RFID* y Grabación de video

Para la localización de la persona dentro del hogar, se implementan sensores adicionales, como el sensor *RFID*. Para su función, las etiquetas *RFID (tags*), se ubican en los accesos de las habitaciones y el sujeto porta el lector *RFID,* que envía información al sistema sobre la ubicación de la persona. A través del sensor *RFID* el sistema podrá comenzar la grabación de un video con duración a tres minutos únicamente de la habitación en la que fue ubicado.

Sensor acelerómetro y giroscopio.

Se desarrolló una aplicación móvil en *Android Studio*, que permite adquirir datos del sensor acelerómetro y giroscopio de un teléfono inteligente Moto G8, ubicado en la cintura del portador. La aplicación permite enviar los datos del sensor a una frecuencia de 60 Hz.
Se implementa un de filtro pasa bajo a cada una de las señales:

- Sensor acelerómetro: mide m/s^2 la fuerza de aceleración que se aplica a un dispositivo en los tres ejes físicos (*x, y, z*).
- Sensor giroscopio: mide en rad/s la velocidad de rotación de un dispositivo alrededor de cada uno de los tres ejes físicos (*x, y, z*).

Estimación de la pose humana: *MediaPipe Pose*

El sistema realiza, el procesamiento de video con la librería *Media Pipe Pose* (Bazarevsky, V et al., 2020) para realizar la estimación de la pose humana, que permite extraer 33 puntos de referencia del cuerpo humano, proporciona las coordenadas cartesianas *(x,y)* de las articulaciones del cuerpo humano, se seleccionan las articulaciones de mayor interés, para realizar cálculos que serán detallados más adelante.

Medida de proximidad

Se realiza el cálculo, de una medida de proximidad, que indica una cercanía de las articulaciones del cuerpo humano, con respecto a las coordenadas de los objetos identificados en las habitaciones. Se calcula la distancia *Manhattan*, utilizando las coordenadas cartesianas *(x,y)* de las articulaciones y el centro *(x, y)* del objeto identificado, para obtener la caracterización de las actividades realizadas por una persona.

Actividades

El sistema se implementa en cuatro habitaciones controladas de un hogar y realiza la caracterización de 16 actividades de la vida diaria, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Actividades de la vida diaria

Habitación	Actividades
Cocina	Tomar alimento, lavar, cocinar, salir al jardín, preparar alimento
Comedor	Comer, tomar fruta, usar microondas
Sala de estar	Hablar por teléfono, ver TV, leer periódico, salir de casa
Dormitorio	Dormir, usar PC, Ejercitarse, aseo personal

Grafos

Se diseñó un grafo para cada una de las habitaciones, que permite representar mediante estados y transiciones las actividades que puede realizar una persona en ese espacio de distribución. El sistema al término del procesamiento del video genera el grafo que representa las actividades realizadas por una persona.

Máquina de estado finito

El modelo propuesto utiliza máquinas de estado finito (*Finite State Machine*) también llamado autómata finito, a través de un alfabeto, transiciones, un estado inicial y conjunto de estados finales, se puede obtener un patrón resultado de comenzar en un estado inicial y finalizar con un estado de aceptación o no aceptación. El patrón contiene información de la secuencia de actividades realizadas por una persona, que permite modelar su comportamiento. La máquina de estado finito define los estados de aceptación a través del entrenamiento del modelo y permite definir si el patrón es aceptado “normal” o rechazado “anormal”.

4.1 *Conjunto de datos*

El sistema realiza, el monitoreo de una rutina, que se ha dividido en tres periodos. Para la experimentación, se definió una rutina con 7 días de lunes a domingo y grabaciones de video con una duración de tres minutos. Nuestro conjunto de datos, está organizado por cada día de la semana y por tres periodos: matutino, vespertino y nocturno.

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Se realizó el entrenamiento de una rutina con duración a 7 días, se dividieron los días de la semana, en periodos matutino, vespertino y nocturno, dónde la persona realiza actividades de la vida diaria con frecuencia y de manera continua.

El modelo realiza la localización de una persona dentro del hogar, utilizando sensores de radiofrecuencia *RFID* ubicados, en los accesos de las habitaciones, como se observa en la Figura 2.

ISSN en trámite

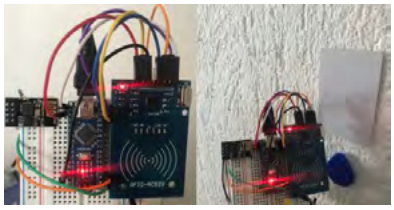


Fig. 2 Sensor *RFID*

Para caracterizar la actividad de una persona, se adquiere datos utilizando la configuración espacial de las articulaciones del cuerpo de la persona Figura 3, y se realiza un cálculo de proximidad, con respecto a objetos previamente identificados Figura 4.



Fig. 3 Estimación de la pose humana usando *Media Pipe Pose*



Fig. 4 Objetos identificados por *YOLO V3*

Al término de procesar un video por el sistema, se obtiene como resultado una la secuencia de las actividades realizadas. El modelo construye grafos dirigidos Figura 5, que representan la secuencia de actividades realizadas por un sujeto.

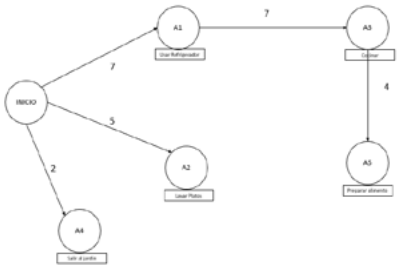


Fig. 5 Grafo que corresponde a la habitación “Cocina”

Por ejemplo, obtener la siguiente secuencia: A1,A3,A5 representa que el sujeto hizo uso del refrigerador, cocinó un alimento y preparó finalmente su alimento.

Los grafos generados, para cada una de las habitaciones monitoreadas, el recorrido de secuencias de actividades y las máquinas de estado finito, entrenan al modelo para que, aprenda una rutina de actividades diarias, para modelar un comportamiento normal.

Además de considerar métricas, como el valor del recorrido del grafo, frecuencia con la que se visita un estado del grafo e identificar, que estados se recorren únicamente en algunos días de la semana.

Estas métricas nos permiten evaluar, un comportamiento normal y centrarnos en la secuencia de actividades, frecuencias, periodos y días de la rutina.

El patrón introducido a la máquina de estados Figura 6, es la secuencia de actividades realizadas, que produce una salida que es evaluada, en conjunto con las métricas para determinar, el reconocimiento de una anomalía, en el comportamiento de la persona estudiada.

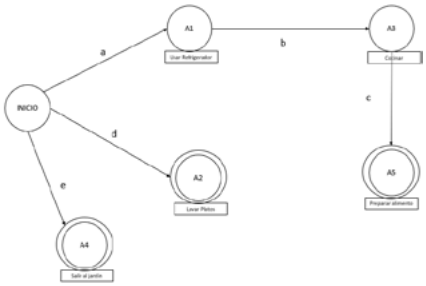


Fig. 6 Representación de máquina de estado habitación “Cocina”

6. CONCLUSIÓN

En el desarrollo de este modelo, para la detección de anomalías en el comportamiento de una persona, se ha observado que es posible modelar un comportamiento “normal” y basándonos en el avance de la experimentación realizada, los resultados obtenidos permiten, el enriquecimiento del modelo. Se ha logrado observar, métricas que deben ser consideradas para hacer la detección, de un evento “anormal” en el comportamiento de una persona. Con el avance de la tecnología, la propuesta de este modelo para la detección de anomalías, podría aplicarse a una amplia variedad de situaciones en la vida real, como, por ejemplo, dentro de un entorno escolar, monitoreo de adultos mayores o monitoreo de personas que requieran una vida independiente dentro del hogar.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), así como al CONACYT por el apoyo brindado para realizar esta investigación.

ISSN en trámite

REFERENCIAS

F. Bobick, & J. W. Davis (2001). The recognition of human movement using temporal templates. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 23(3), 257-267.

M. Babiker, O. O. Khalifa, K. K. Htike, A. Hassan, & M. Zaharadeen (2017). Automated daily human activity recognition for video surveillance using neural network. In *2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)* (pp. 1-5).

Bazarevsky, V., Grishchenko, I., Raveendran, K., Zhu, T., Zhang, F., & Grundmann, M.. (2020). BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking.

S. Gaglio, G. L. Re, & M. Morana (2015). Human Activity Recognition Process Using 3-D Posture Data. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 45(5), 586-597.*

Ganesh, P., Idgahi, R., Venkatesh, C., Babu, A., & Kyrarini, M. (2020). Personalized System for Human Gym Activity Recognition Using an RGB Camera. In Proceedings of the 13th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments. Association for Computing Machinery.

Nweke, H., Wah, T., Mujtaba, G., & Al-Garadi, M. (2018). Data Fusion and Multiple Classifier Systems for Human Activity Detection and Health Monitoring: Review and Open Research Directions. *Information Fusion, 46.*

M. K. Hossen, & S. H. Tuli (2016). A surveillance system based on motion detection and motion estimation using optical flow. *In 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV) (pp. 646-651).*
Zhen-Yu He, & Lian-Wen Jin (2008). Activity recognition from acceleration data using AR model representation and SVM. In *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics* (pp. 2245-2250).

Lara, Ó., Perez, A., Labrador, M., & Posada, J. (2012). Centinela: A human activity recognition system based on acceleration and vital sign data. *Pervasive and Mobile Computing, 8, 717.*

U. Maurer, A. Smailagic, D. P. Siewiorek, & M. Deisher (2006). Activity recognition and monitoring using multiple sensors on different body positions. In *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN'06)* (pp. 4 pp.-116).

Mettel, M., Alekseew, M., Stocklöw, C., & Braun, A. (2019). Designing and evaluating safety services using depth cameras. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 10

M. Pavel, H. B. Jimison, I. Korhonen, C. M. Gordon, & N. Saranummi (2015). Behavioral Informatics and Computational Modeling in Support of Proactive Health Management and Care. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 62(12), 2763-2775.*
Redmon, J., & Farhadi, A.. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement.
Poppe, R. (2010). A Survey on Vision-Based Human Action Recognition. *Image Vision Comput., 28(6), 976–990.*

M. Skubic, R. D. Guevara, & M. Rantz (2015). Automated Health Alerts Using In-Home Sensor Data for Embedded Health Assessment. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine, 3, 1-11.*

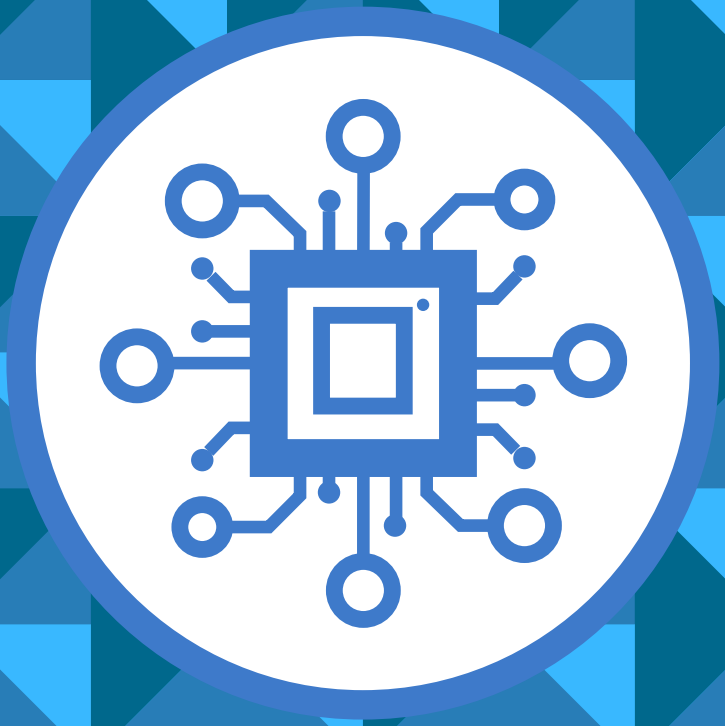
J. Thummala, & S. Pumrin (2020). Fall Detection using Motion History Image and Shape Deformation. In *2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON)* (pp. 1-4).

Vishwakarma, S., & Agrawal, A. (2012). A Survey on Activity Recognition and Behavior Understanding in Video Surveillance. *The Visual Computer, 29.*

Vaňuš, J., Belesova, J., Martinek, R., Nedoma, J., Fajkus, M., Bilik, P., & Žídek, J. (2017). Monitoring of the daily living activities in smart home care. *Human-centric Computing and Information Sciences, 7.*

Yin, J., Yang, Q., & Pan, J. (2008). Sensor-Based Abnormal Human-Activity Detection. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 20(8), 1082-1090*

Cao, Z., Simon, T., Wei, S.E., & Sheikh, Y.. (2016). Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields.



INGENIERÍA ELECTRÓNICA

cenidet®

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Diseño de un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes superficiales para mini compresor

Sergio I. Suriano S.* Mario Ponce S.* Víctor H. Olivares P.*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,TecNM, Cuernavaca, Morelos, México, (e-mail: m20ce079@cenidet.tecnm.mx), (e-mail: mario.ps@cenidet.tecnm.mx), (e-mail: victor.op@cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: Los motores síncronos de imanes permanentes han cobrado mayor importancia en los últimos años debido a sus ventajas con respecto a los de escobillas y a los de inducción. En este artículo se presenta el diseño de un motor síncrono de imanes en superficie con aplicación para un compresor de pequeñas dimensiones. El análisis general para obtener las ecuaciones de diseño es desarrollado y los cálculos se comparan con los resultados de simulaciones hechas en el software FEMM, donde se comprueba que el desempeño de la máquina coincide con lo esperado.

Palabras clave: Motor eléctrico, electromagnetismo, diseño, capacidad y evaluación de desempeño, eficiencia energética

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los motores eléctricos han crecido en popularidad por sus aplicaciones en vehículos eléctricos. Sin embargo, estos dispositivos han estado presentes en la vida diaria de casi todas las personas desde hace ya varias décadas. Por lo anterior, la investigación orientada al mejoramiento de los motores se ha incrementado notablemente.

De entre los tres tipos principales de motores, que son los de inducción, de imanes permanentes, de escobillas y de reluctancia, son los motores síncronos de imanes permanentes (tanto de imanes superficiales como de imanes interiores) los que más importancia han ganado frente a los otros debido a las ventajas que presentan en campos como la eficiencia, densidad de potencia y facilidad de diseño y fabricación. Por estas razones, en este artículo se presenta el análisis general de un motor síncrono de imanes superficiales con aplicación en un compresor de baja potencia, su diseño y la evaluación de su desempeño mediante simulaciones de elemento finito, todo basado en la información recogida de (Hanselman, 2003, Ronghai and Lipo, 2004b, Ronghai and Lipo, 2004a).

En el artículo, primero se establece la máquina a analizar y su circuito magnético equivalente, a partir de ello se hallan las ecuaciones principales para diseñar la geometría de la máquina y sus características eléctricas, después se presenta la lista de parámetros necesarios para realizar el diseño y además se calculan las magnitudes geométricas y eléctricas del motor. Al final se presentan los resultados de las simulaciones hechas a partir de los cálculos realizados.

2. OPERACIÓN DE LA MÁQUINA

2.1 Ecuaciones geométricas y magnéticas básicas

Para el análisis magnético del motor, se considera una sección y posición del motor en donde se encuentren presentes los lazos de flujo, como la de la Fig. 1.

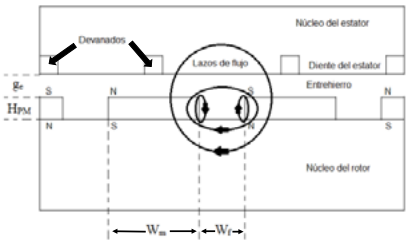


Fig. 1. Modelo lineal simple del motor.

De los lazos de flujo se deduce el circuito magnético mostrado en la Fig. 2.

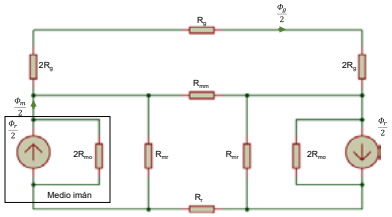


Fig. 2. Circuito magnético deducido de la Fig. 1.

ISSN en trámite

Donde:

Φ_g	Flujo en el entrehierro para un imán
Φ_r	Fuente de flujo de un imán
R_g	Reluctancia correspondiente a Φg
R_{mo}	Reluctancia de un imán, correspondiente a Φr
R_s	Reluctancia del núcleo del estator
R_r	Reluctancia del núcleo del rotor
R_{mr}	Reluctancia correspondiente al flujo de fuga de imán-rotor
R_{mm}	Reluctancia correspondiente al flujo de fuga de imán-imán

Asumiendo que no existirá saturación en el núcleo del rotor ni del estator, los valores de R_s y R_r son despreciables con respecto a R_g, por lo que el circuito se simplifica como se muestra en la Fig. 3.

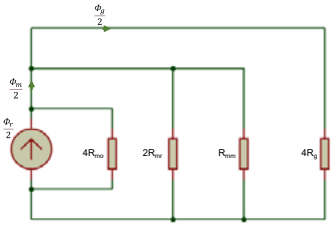


Fig. 3. Circuito magnético simplificado.

Con el objetivo de calcular a Φ_g se suman en paralelo las tres reluctancias de la izquierda.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{4R_{mo}} + \frac{1}{2R_{mr}} + \frac{1}{R_{mm}}}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{2R_{mr}R_{mm}} \frac{8R_{mo}R_{mr}R_{mm}}{1 + 2\frac{R_{mo}}{R_{mr}} + 4\frac{R_{mo}}{R_{mm}}}$$

Para reducir la expresión se establecen los siguientes términos

$$\eta = \frac{R_{mo}}{R_{mr}} \quad \lambda = \frac{R_{mo}}{R_{mm}}$$

Por lo que la ecuación queda de la siguiente forma

$$R_{eq} = \frac{4R_{mo}}{1 + 2\eta + 4\lambda} \tag{1}$$

Si se establece $R_m = \frac{R_{mo}}{1 + 2\eta + 4\lambda}$, entonces $R_{eq} = 4R_m$, lo que resulta en el circuito de la Fig. 4.

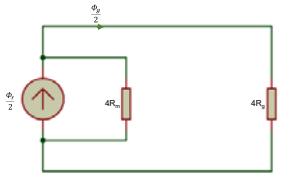


Fig. 4. Circuito reducido para calcular a Φ_g.

Por división de flujo, Φ_g se encuentra como

$$\frac{\Phi_g}{2} = \frac{\frac{\Phi_r}{2} 4R_m}{4R_m + 4R_g} \therefore \Phi_g = \frac{\Phi_r}{1 + \frac{R_g}{R_{mo}}(1 + 2\eta + 4\lambda)} \tag{2}$$

De manera similar se deduce la ecuación para el flujo que sale del imán, de manera que resulta

$$\Phi_m = \frac{1 + \frac{R_g}{R_{mo}}(2\eta + 4\lambda)}{1 + \frac{R_g}{R_{mo}}(1 + 2\eta + 4\lambda)} \Phi_r \tag{3}$$

Convirtiendo ambas expresiones a densidad de flujo resulta

$$B_{g,ave} = \frac{\frac{A_m}{A_g}}{1 + \frac{R_g}{R_{mo}}(1 + 2\eta + 4\lambda)} B_r$$

$$B_m = \frac{1 + \frac{R_g}{R_{mo}}(2\eta + 4\lambda)}{1 + \frac{R_g}{R_{mo}}(1 + 2\eta + 4\lambda)} B_r \tag{4}$$

Las expresiones para R_{mr} y R_{mm} se obtienen a través de su permeabilidad con el modelo de arco circular-línea recta, que es uno de los más satisfactorios para modelar el flujo en el entrehierro. Los diagramas se ven en la Fig. 5 y la Fig. 6.

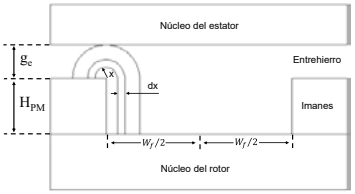


Fig. 5. Modelo de permeabilidad de arco circular-línea recta para Rmr.

ISSN en trámite

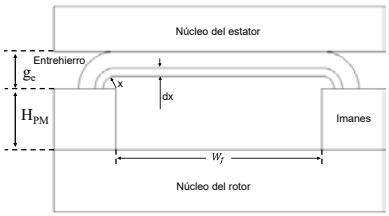


Fig. 6. Modelo de permeabilidad de arco circular-línea recta para R_{mm}.

La permeabilidad "de fleco" P_{mr} resulta de una suma infinita de permeabilidades de ancho diferencial, cada una de largo $H_{PM}+\pi x$.

$$P_{mr} = \sum \frac{\mu_0 L dx}{H_{PM} + \pi x} \tag{5}$$

Resolviendo como integral debido a la presencia de elementos diferenciales y considerando el caso usado comúnmente en la práctica donde $g_e < W_f/2$ la solución es

$$P_{mr} = \int_0^{g_e} \frac{\mu_0 L}{H_{PM} + \pi x} dx = \frac{\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi g_e}{H_{PM}}\right) \tag{6}$$

Mediante un procedimiento análogo se encuentra la permeabilidad de imán a imán

$$P_{mm} = \int_0^{g_g} \frac{\mu_0 L}{w_f + \pi x} dx = \frac{\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi g_e}{w_f}\right) \tag{7}$$

Usando ahora la definición de reluctancia y la geometría de la máquina, se obtienen las siguientes expresiones

$$R_g = \frac{g_e}{\mu_0 (w_m + 2g_e) L} \qquad R_{mo} = \frac{H_{PM}}{\mu_0 \mu_r A_m}$$

$$A_m = w_m L\,, \quad A_f = w_f L\,, \quad A_g = (w_m + w_f) L$$

Donde μ_o es la permeabilidad del aire, L es la longitud de la pila de láminas de acero y g_e es el ancho efectivo del entrehierro tomando en cuenta las ranuras del estator. El "efecto de flecos" también es considerado añadiendo $2g_e$ a w_m en el cálculo de R_g. Tomando en cuenta que

$$R_{mr} = \frac{1}{P_{mr}} \qquad R_{mm} = \frac{1}{P_{mm}}$$

Las expresiones para λ y η cambian a la siguiente forma

$$\eta = \frac{H_{PM}}{\pi \mu_r w_m} \ln\left(1 + \frac{\pi g_e}{H_{PM}}\right) \quad \lambda = \frac{H_{PM}}{\pi \mu_r w_m} \ln\left(1 + \frac{\pi g_e}{w_f}\right) \tag{8}$$

Sustituyendo R_g, R_{mo}, A_m, A_f y A_g en las ecuaciones de B_g y B_m se obtiene

$$B_{g,ave} = \left[1 + \frac{w_f}{w_m} + \mu_r \frac{g_e}{H_{PM}} \frac{w_m + w_f}{w_m + 2g_e} (1 + 2\eta + 4\lambda)\right]^{-1} B_r$$

$$B_m = \frac{\left(1 + \frac{2g_e}{w_m}\right) \frac{1}{\mu_r} \frac{H_{PM}}{g_e} + 2\eta + 4\lambda}{\left(1 + \frac{2g_e}{w_m}\right) \frac{1}{\mu_r} \frac{H_{PM}}{g_e} + 1 + 2\eta + 4\lambda} B_r \tag{9}$$

En este punto es posible calcular un coeficiente de flujo de fuga para mejorar la exactitud de los cálculos. Uno de los flujos de fuga más importantes es el que se da cuando un diente del estator cortocircuita el flujo proveniente de los imanes, como se muestra en la Fig. 7.

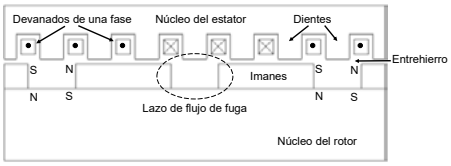


Fig. 7. Flujo de fuga cortocircuitado por un diente del estator.

Para obtener la expresión de este flujo de fuga se asume que las reluctancias de rotor y estator son despreciables y que

$$\frac{t_o + b_o}{2} > w_f \tag{10}$$

Donde t_o es el ancho de la zapata del diente y b_o es la abertura entre dientes. Por cuestiones de espacio, no se presenta el procedimiento completo para obtener la expresión del factor de flujo de fuga, pero puede ser consultado en (Ronghai and Lipo, 2004a). El factor de flujo de fuga es, entonces

$$K_{Lt} = 1 - \frac{(t_o + b_o - w_f)^2}{2w_m (t_o + b_o)} \tag{11}$$

Ahora, para calcular el ancho del núcleo magnético del rotor se debe tomar en cuenta que el flujo que sale del imán se divide en dos partes iguales, una hacia el núcleo del rotor y la otra hacia el estator.

$$\Phi_{cr} = \frac{\Phi_m}{2} \tag{12}$$

Aplicando la definición de densidad de flujo

$$B_{cr} d_{yr} L = \frac{B_m w_m L}{2} \therefore d_{yr} = \frac{B_m w_m}{2 B_{cr}} \tag{13}$$

En la parte del estator, el flujo del entrehierro se distribuye en el espacio que abarca el paso de ranura, llamado τ_s. Aplicando

ISSN en trámite

la definición de densidad de flujo y tomando en cuenta el coeficiente de flujo de fuga, se tiene

$$B_{ts} w_{ts} K_{fe} L = K_{Lt} B_g L \tau_s \therefore w_{ts} = \frac{K_{Lt} B_g \tau_s}{K_{fe} B_{ts}} \quad (14)$$

Si d_1 es la longitud del diente sin la zapata, θ_s es el paso angular de la ranura y R_{sb} es el radio hasta el fondo de la ranura, la siguiente expresión aproxima el área de la ranura a un rectángulo cuya base es la longitud a la mitad de la ranura y la altura es d_1

$$A_s = d_1 \left[\theta_s \left(R_{sb} - \frac{d_1}{2} \right) - w_{ts} \right] \quad (15)$$

Además, la altura de la zapata suele determinarse como una fracción del ancho del diente. Si d_2 es la altura de la base de la zapata y d_3 es la altura de la transición zapata-diente, la altura total de la zapata se determina como

$$d_2 + d_3 = \alpha_{sd} w_{ts} \quad (16)$$

Finalmente, el ancho del núcleo del estator se calcula como

$$d_{ys} = \frac{K_{Lt} B_g \tau_p}{2 K_{fe} B_{cs}} \quad (17)$$

Donde B_{cs} es la densidad de flujo máxima deseada en el núcleo del estator y τ_p es el arco de polo. Con estas expresiones es posible calcular todas las demás dimensiones.

2.2 Ecuaciones eléctricas y de desempeño

La frecuencia de la señal de alimentación se determina a partir de las revoluciones por minuto deseadas.

$$\omega_m = \frac{\pi}{30} S_r, \quad \omega_e = \frac{N_m}{2} \omega_m, \quad f_e = \frac{\omega_e}{2\pi} \quad (18)$$

El torque resultante es entonces hallado mediante la división de la potencia entre la frecuencia angular.

$$T = \frac{P}{\omega_m} \quad (19)$$

A través del análisis mostrado en (Hanselman, 2003), se encuentra la expresión para la fuerza contraelectromotriz

$$e_{\max} = \frac{T \omega_m}{i} = N_m k_d k_p k_s B_g L R_{PM} N_{spp} n_s \omega_m \quad (20)$$

De donde se deducen las expresiones para el número de vueltas por ranura y la corriente total de ranura

$$n_s = \text{int}\left(\frac{E_{\max}}{N_m k_d k_p k_s B_g L R_{PM} N_{spp} \omega_m} \right)$$
$$I_s = \frac{T}{N_m k_d k_p k_s B_g L R_{PM} N_{spp}} \quad (21)$$

Si la máquina es alimentada con señales sinusoidales, la corriente máxima de fase y la densidad de corriente de ranura son

$$I_{ph} = \frac{I_s}{N_{ph} n_s} \sqrt{2}, \quad J_c = \frac{I_s}{k_{cu} A_s} \quad (22)$$

Donde k_{cu} es el factor de llenado de los conductores. Las componentes de la resistencia de ranura son

$$R_s = \frac{\rho n_s^2 L}{k_{cu} A_s} \qquad R_e = \frac{\rho n_s^2 \pi \tau_c}{2 k_{cu} A_s} \quad (23)$$

Por lo que la resistencia de fase, considerando el número de ranuras por fase es

$$R_{ph} = N_{sp} \left(R_s + R_e \right) \quad (24)$$

Así, las pérdidas en el cobre, considerando las tres fases, se obtiene como

$$P_r = N_{ph} \frac{I_{ph}^2}{2} R_{ph} \quad (25)$$

Para las pérdidas en el núcleo, es deseable emplear la información que proveen los fabricantes de las láminas de hierro magnético. Con eso en cuenta, las pérdidas en el núcleo se pueden aproximar a

$$P_{cl} = \rho_{bi} V_{st} \Gamma \left(B_{\max}, f_e \right) \quad (26)$$

Donde ρ_{bi} es la densidad del hierro del núcleo en kg/m3, V_{st} es el volumen del estator y $\Gamma \left(B_{\max}, f_e \right)$ es la densidad de pérdidas en el núcleo en W/kg del material del estator a la densidad de flujo B_{max} y la frecuencia f_e. El volumen del estator se da aproximadamente por

$$V_{st} = \left[\pi \left(R_{os}^2 - R_{is}^2 \right) - N_s A_s \right] L k_{fe} \quad (27)$$

Donde N_s es el número de ranuras, R_{os} y R_{is} son los radios interno y externo del estator, L es la longitud de la máquina y k_{fe} es el factor de apilado de las láminas de hierro. Así, la eficiencia se expresa como

$$\eta = \frac{T \omega_m}{T \omega_m + P_r + P_{cl} + P_s} 100\% \quad (28)$$

Donde P_s son las pérdidas adicionales debidas a factores mecánicos como las diferentes fuentes de fricción.

ISSN en trámite

2.3 Parámetros y diseño del motor a simular

Aunque no se pretende hacer una réplica, algunos parámetros de diseño fueron obtenidos de (Rasmussen and Ritchie, 1997), donde se desarrolló un motor utilizado en el compresor de un refrigerador de pequeñas dimensiones. Los demás parámetros se eligieron pensando en mantener una alta eficiencia y bajo rizo de torque. La lista de parámetros se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño

Parámetro	Valor	Descripción
P	20 W	Potencia de salida
η	90 %	Eficiencia
S_r	1800 rpm	Velocidad de giro
$E_{máx}$	30 V	Fuerza contraelectromotriz
N_{ph}	3	Número de fases
N_m	4	Número de imanes
N_{sp}	4	Número de ranuras por fase
g	0.35 mm	Longitud del entrehierro
R_{pm}	22 mm	Radio hasta la superficie del imán
R_{sb}	37 mm	Radio hasta el fondo de la ranura
L	21 mm	Longitud axial del motor
k_{fe}	0.9	Factor de apilado de las láminas
$\Gamma(B,f)$	1.7 W/kg	Densidad de pérdidas del núcleo vs densidad de flujo y frecuencia
ρ_{bi}	7650 kg/m^3	Densidad del hierro
ρ	17.2 nΩ/m	Resistividad del cobre
k_{cu}	0.5	Factor de llenado de conductores
α_{mp}	0.84	Fracción del polo ocupada por imán
B_r	0.4 T	Densidad de flujo remanente del imán
B_{cr}	0.5 T	Densidad de flujo del núcleo del rotor
B_g	0.25 T	Densidad de flujo del entrehierro
B_{cs}	0.8 T	Densidad de flujo del núcleo del estator
B_{ts}	0.8 T	Densidad de flujo en el diente
μ_R	1.05	Permeabilidad de retroceso del imán
w_s	1 mm	Abertura de la ranura
α_{sd}	0.38	Porción de la profundidad de la zapata

Aplicando las ecuaciones de diseño obtenidas a partir de (Hanselman, 2003, Ronghai and Lipo, 2004a), se encuentran los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones y características del motor diseñado

Variable	Resultado
Frecuencia eléctrica fundamental	$f_e = 60$ Hz
Torque a partir de la potencia	T = 106.103 mNm
Número de ranuras	$N_s = 12$
Radio interior del estator	$R_{is} = 22.35$ mm
Longitud de imán	$w_m = 29.028$ mm
Altura del imán	$H_{PM} = 1.08$ mm
Ancho del núcleo del rotor	$d_{yr} = 8.71$ mm
Radio externo del rotor	$R_{or} = 20.92$ mm
Radio interno del rotor	$R_{ir} = 12.21$ mm
Ancho del diente	$w_{ts} = 3.835$ mm
Ancho del núcleo del estator	$d_{ys} = 5.735$ mm
Área de la ranura	$A_s = 159.418*10^{-6}$ m^2
Número de vueltas por ranura	$n_s = 344$
Corriente de fase	$I_{ph} = 0.315$ A
Resistencia de fase	$R_{ph} = 7.778$ Ω
Pérdidas óhmicas	$P_r = 1.156$ W
Pérdidas en el hierro	$P_{cl} = 0.488$ W
Eficiencia (sin pérdidas mecánicas)	$\eta = 92.408$ %

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones se hicieron en régimen permanente. La Fig. 8 muestra el motor, las densidades de flujo y las líneas del campo en un instante de su operación. Se observa que las densidades de flujo son muy cercanas a las esperadas.

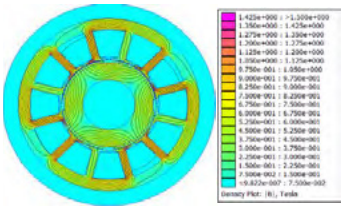


Fig. 8. Motor simulado.

La Fig. 9 muestra la gráfica del torque a lo largo de 360 grados eléctricos. Como se observa, el torque no es constante, sino que tiene variaciones debido a la naturaleza de las corrientes sinusoidales separadas 120 grados entre sí. En este caso, el rizo de torque es de 7.26%, que es bastante bajo; mientras que el torque promedio es de 109.273 mNm, lo que representa un 3% de error con respecto a lo calculado.

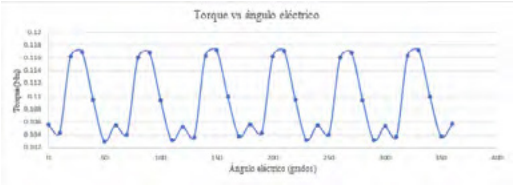


Fig. 9. Torque del motor en un periodo eléctrico.

La Fig. 10 muestra la densidad de flujo enlazado por una fase a través del entrehierro, a lo largo de 360 grados eléctricos. Debido a que la señal de corriente inyectada al motor se simuló como sinusoidal, la forma de la gráfica de densidad de flujo es también casi perfectamente sinusoidal y tiene un pico de 0.246 T, mientras que el valor esperado es de 0.25 T, lo que indica un error de 1.6%.

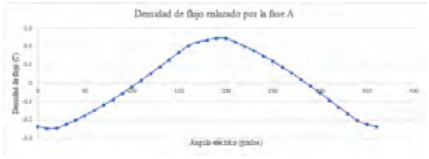


Fig. 10. Densidad de flujo enlazado por la fase A.

ISSN en trámite

La Fig. 11 muestra la fuerza contraelectromotriz en una de las fases. Ya que la fórmula contiene únicamente términos constantes a excepción de la densidad de flujo, la forma de onda es igual a la de la densidad de flujo, precisamente. En este caso, el valor pico de la señal es de 29.53V, mientras que el valor esperado es de 30V, lo que representa un error de 1.57%.

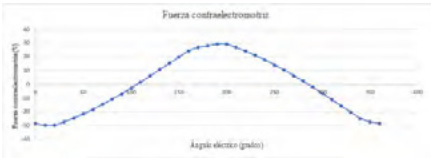


Fig. 11. Fuerza contraelectromotriz en un periodo eléctrico.

Con respecto a las pérdidas, lamentablemente el software no es capaz de realizar análisis transitorios, por lo que no es posible determinar las pérdidas en el cobre ni en el hierro. Además, por resolver los problemas en dos dimensiones, solo es capaz de calcular la resistencia de los conductores de las ranuras, pero no la de los que van de ranura a ranura, llamada "resistencia de fin de vuelta". Aun así, la resistencia de fase calculada únicamente considerando los el cobre de las ranuras (como un solo conductor) es de 2.145 Ω, mientras que la resistencia obtenida en el simulador (a partir de cables de calibre 24) es de 2.432 Ω, lo que significa que hay un 11.8% de error. Con esto y todos los resultados anteriores, se afirma que la eficiencia también estará muy cerca del valor esperado.

La Tabla 3 resume algunos de los datos obtenidos más relevantes.

Tabla 3. Datos estimados vs datos obtenidos

Magnitud	Valor estimado	Valor obtenido	Error
Torque	106.103 mNm	109.273 mNm	3 %
Densidad de flujo en el entrehierro	0.25 T	0.246 T	1.6 %
Fuerza contraelectromotriz	30 V	29.53 V	1.57 %
Eficiencia	90 %	92.408 %	2.408%
Rizo de torque	10 %	7.26 %	2.74 %

6. CONCLUSIONES

Se mostró el procedimiento de análisis para encontrar las ecuaciones de diseño de un motor síncrono de imanes superficiales. También se diseñó y simuló un motor de baja potencia con aplicación para compresor de pequeñas dimensiones. Al final, los resultados de la simulación coincidieron suficientemente bien con los cálculos, demostrando la validez de las ecuaciones de diseño.

Se encontró que las densidades de flujo en las diferentes partes del motor son cercanas a las esperadas, aunque un poco más altas en los dientes y un poco más bajas en el núcleo del estator y el del rotor.

También fue posible observar que el torque del motor no es perfectamente constante, sino que tiene fluctuaciones periódicas. Esto se debe a dos razones: a que la atracción entre los imanes y los dientes del estator producen torque indeseado y a que el torque depende de la corriente total presente en la máquina, la cual no es constante, pues el motor es alimentado con señales de corriente separadas 120 grados entre sí. De cualquier manera, el rizo de torque resultó de 7.26%, lo que es bastante bajo y el torque promedio fue de 109.273 mNm, solo 3% arriba de lo calculado.

En cuanto a la densidad de flujo en el entrehierro y la fuerza contraelectromotriz, ambas resultaron senoides casi perfectas con valores muy cercanos a los esperados, debido a que las señales de corriente simuladas se establecieron también como senoides.

Finalmente, se observó que la resistencia de fase simulada fue muy cercana a la calculada. Desafortunadamente el programa no es capaz de calcular la parte de la resistencia de fase debida a los conductores que van de ranura a ranura ni puede hacer un análisis transitorio que permita calcular las pérdidas en el hierro del estator. Sin embargo, por la cercanía de los valores de resistencia y densidad de flujo simulados y calculados, se deduce que la eficiencia será también similar a la esperada.

Un aspecto que hay que tener en cuenta es que, en una aplicación real, sería necesario un sistema de control que mantenga siempre sinusoidal a la corriente de alimentación, pues de otra manera el desempeño de la máquina disminuiría en todos los aspectos. Es preciso mencionar también que ni el análisis del motor ni las ecuaciones y procedimiento de diseño se presentaron completos por falta de espacio. También se omitieron características como la curva torque-velocidad o el comportamiento de arranque a rotor bloqueado. Sin embargo, toda la información necesaria se encuentra en las referencias utilizadas.

REFERENCIAS

HANSELMAN, D. C. 2003. *Brushless permanent magnet motor design*, The Writers' Collective.

RASMUSSEN, C. B. & RITCHIE, E. Variable speed brushless DC motor drive for household refrigerator compressor. 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444), 1-3 Sept. 1997 1997. 128-132.

RONGHAI, Q. & LIPO, T. A. 2004a. Analysis and modeling of air-gap and zigzag leakage fluxes in a surface-mounted permanent-magnet Machine. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 40**,** 121-127.

RONGHAI, Q. & LIPO, T. A. 2004b. Design and parameter effect analysis of dual-rotor, radial-flux, toroidally wound, permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 40**,** 771-779.

ISSN en trámite

Simulación en 3D de Tomografía de Impedancia Eléctrica para la Detección de Tumores en la Mama con Interconexión en MATLAB y COMSOL.

Juan Carlos Gómez-Cortés*. Carolina Matheus-Troconis. José Javier Diaz-Carmona***. José Alfredo Padilla-Medina****. Juan Prado-Olivarez*****Alejandro I. Barranco-Gutiérrez ******.**

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya 38010, México
**e-mail: m1703042@itcelaya.edu.mx*
****e-mail: javier.diaz@itcelaya.edu.mx*
*****e-mail: alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx*
******e-mail: juan.prado@itcelaya.edu.mx*
*******e-mail: israel.barranco@itcelaya.edu.mx*
Centro de Diagnóstico Médico, Celaya 38070, México
***e-mail: caromatheus@hotmail.com*

Abstract: Este artículo describe los alcances de una simulación en 3D de una mama con características eléctricas realistas, se describen el procedimiento desde la simulación hasta la reconstrucción de imágenes utilizando el software de MATLAB y COMSOL. Los elementos de la simulación de la mama (tejido adiposo, tejido mamario y tumores) presentan características eléctricas expuestas por autores en pruebas exvivo. Se evidencian las principales ventajas de la tomografía de impedancia eléctrica; número modesto de electrodos, facilidad para la representación de secciones transversales utilizando librerías como EIDORS y la utilidad de una simulación para definir las características necesarias para una implementación física.

Keywords: tomografía impedancia eléctrica, tumor, cáncer de mama, simulación, 3D, reconstrucción, MATLAB, COMSOL.

1. INTRODUCCIÓN

El cáncer de mama es una enfermedad neoplásica maligna del tejido mamario, una enfermedad común en las mujeres. Una de cada ocho mujeres desarrollará cáncer de mama en su vida. La incidencia aumenta con la edad de la tercera a la quinta década. El cáncer de mama tiende a invadir los tejidos que lo rodean, así como órganos distantes. Los conocimientos actuales sobre las causas del cáncer de mama son insuficientes por lo que una detección oportuna aumenta el porcentaje de éxito de un tratamiento contra el cáncer (Instituto Mexicano del Seguro Social, 2022).

La tomografía de impedancia eléctrica (del inglés Electrical Impedance Tomography) es un método de obtención de imágenes relacionadas con la distribución de impedancias en el interior de un objeto mayormente en 2D (Yan et al, 2011). Usualmente la medición de las impedancias eléctricas en la mama se realiza utilizando electrodos. La conductividad eléctrica de muchos tumores, en particular los tumores malignos de mama, puede diferir significativamente de la conductividad del tejido normal circundante (Rigaud et al, 1996). La aplicación de este método en la detección del cáncer de mama requiere un diseño especial del sistema de medición y un algoritmo de reconstrucción de imágenes, se requiere definir si se representara la medición con una imagen bidimensional o tridimensional. La resolución del sistema TIE cae significativamente a medida que aumenta la distancia entre los electrodos de medición, y los esquemas tradicionales de medición TIE son inadecuados para la mamografía debido a esto. El gran número de electrodos, que se requieren para proporcionar una resolución aceptable del sistema, conduce a enormes aumentos en el tiempo de cálculo para la reconstrucción de la imagen (Cherepenin et al, 2001). Es posible reconstruir la distribución de la impedancia interna de la mama analizada, utilizando un algoritmo de reconstrucción de imágenes apropiado y un modesto número de electrodos para la medición como lo comprueban algunas investigaciones (Zhang et al, 2015a). El uso de la tomografía por impedancia eléctrica (TIE) es una prometedora aplicación para la detección de cáncer. Sus principales ventajas son:

1) Seguridad absoluta al obtener las mediciones.

2) Alto potencial de correlación de la impedancia eléctrica de los tejidos biológicos con su estado fisiológico

3) Los equipos TIE son compactos y baratos.

4) Procedimiento de examen simple y de invasión mínima.

ISSN en trámite

Las desventajas del método son la baja resolución (Gómez et al, 2022), también existe el hecho de que en muchos casos existe la generación dinámica de imágenes (es decir, en la reconstrucción de las imágenes puede existir un cambio de conductividad entre dos mediciones consecutivas) (Cherepenin et al, 2002).

Dentro de las aplicaciones de la TIE para la detección de cáncer en la mama se ha confirmado mediante experimentación que, en tejidos biológicos, la conductividad está relacionada con la frecuencia de la señal de excitación aplicada. La sensibilidad (tamaño mínimo para detectar un tumor) de una técnica depende de diversos factores como la cantidad de electrodos, su distribución en la mama, la frecuencia de medición y el tamaño de los electrodos por mencionar algunos. Se ha propuesto sistemas experimentales con un arreglo anillar de electrodos, y tumores simulados utilizando objetos biológicos (papa y zanahoria) sumergidos en soluciones salinas, teniendo una sensibilidad de detección desde 20 mm (Yang et al, 2017). Se han propuesto además sistemas con arreglos planares de electrodos con la particularidad de poseer un sistema rotativo que aumenta el número de mediciones lo que se traduce en un aumento de resolución para la imagen generada, en esta propuesta se realizaron pruebas en una mama simulada lo que permitió la detección de tumores de hasta 20 mm con errores del 10% (Zhang et al, 2015b). Otra propuesta presenta un sistema compuesto de un analizador de impedancias, un sistema de selección y un par de copas de látex, cada una de las cuales cuenta con un arreglo anillar de ocho electrodos, el sistema demostró un grado aceptable de éxito al detectar anomalías en la mama mayores a 10 mm (Gutierrez, 2019a; Gutierrez et al, 2019b).

La imagen en 3D aplicada en la TIE ha apoyado a mejorar la calidad del diagnóstico de tumores en la mama ya sea representando la forma irregular de tumores (Yang et al, 2017), ayudando a medir la propagación de un tumor dentro de la mama (Cherepenin et al, 2001) o generando imágenes de buena resolución que permitan detectar tumores pequeños (Hong et al, 2015).

2. MARCO TEÓRICO.

La impedancia es un parámetro muy importante utilizado para caracterizar circuitos eléctricos, componentes, y materiales. Impedancia (z) se define generalmente como la total oposición que presenta un dispositivo o un circuito al flujo de corriente alterna, a determinada frecuencia, y es representada como una cantidad compleja cuya grafica muestra un vector en el plano. El principio básico de medición de impedancia consiste en hacer circular una corriente conocida a través de un material y medir el voltaje. El cálculo de la impedancia se obtiene mediante el uso de la ley de Ohm donde Z indica el valor de la impedancia, I el valor de la corriente aplicada y V el voltaje (Ecuación 1).

$$Z = \frac{V}{I} \qquad (1)$$

La impedancia eléctrica de una célula se caracteriza por tener un comportamiento resistivo a bajas frecuencia, donde la mayor parte de la corriente fluye a través del espacio extracelular. Conforme la frecuencia aumenta, la corriente puede cruzar la membrana celular y entrar al espacio intracelular. (Holder 2005). La Figura 1 describe el comportamiento en baja frecuencia de la corriente al inyectar voltaje en una célula.

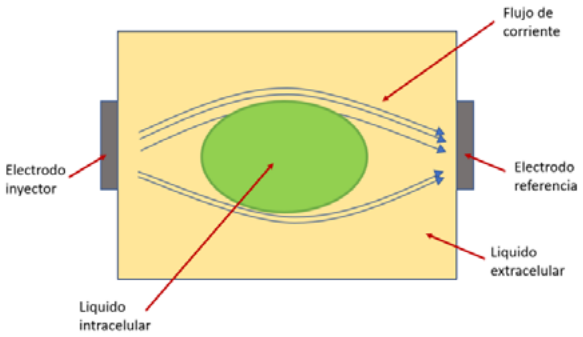


Figura 1. Caracterización de célula en bajas frecuencias.

Existen diferentes técnicas para la medición de impedancia eléctrica, en función de la cantidad de electrodos empleados. Por ejemplo, la técnica cuadrapolar utiliza dos electrodos para la inyección de corriente y dos electrodos independientes para la medición de los valores de voltaje (ver Figura 2). Pero, incluso con un sistema de cuatro electrodos, el flujo de corriente a través de capacitancias parásitas y las impedancias de contacto del electrodo pueden causar errores muy grandes y cambios de fase aparentes (Barber, 1984). Las notaciones RM indican el valor resistivo de la muestra, mientras que RE es el valor resistivo del electrodo (Ver Figura 2).

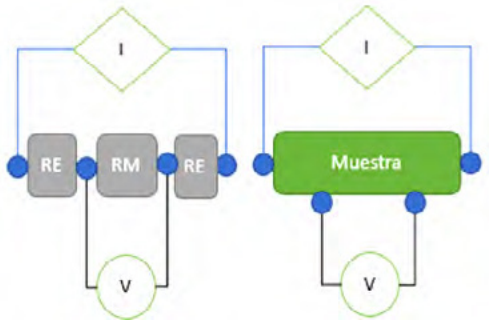


Figura 2. Medición cuadrapolar de una muestra

ISSN en trámite

Una distribución anillar (Figura 3) es un conjunto de electrodos en forma circular alrededor de la muestra a evaluar y a través de una serie de mediciones de impedancia se obtiene una evaluación eléctrica de todo lo que se encuentre dentro de la circunferencia descrita por los electrodos.

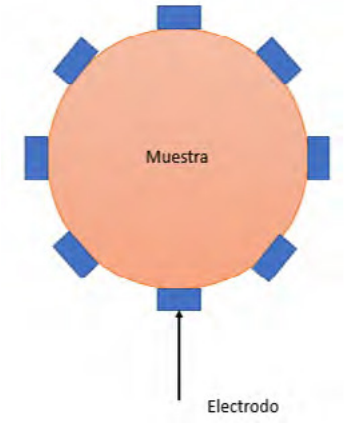


Figura 3. Distribución anillar de electrodos.

3. DESARROLLO

3.1 Diseño 3D del modelo

El primer paso para la simulación es el diseño de un sólido con una anatomía simplificada de una mama. Para el desarrollo de la simulación con modelos 3D de la mama, se utilizó el software COMSOL, las dimensiones del diseño fueron basadas en una copa B estándar. La Figura 4 y Figura 5, muestran las dimensiones del modelo en 3D. El modelo fue diseñado utilizando 3 niveles de electrodos con 12 electrodos cada nivel, 36 electrodos en total con un diámetro de 10 mm cada uno.

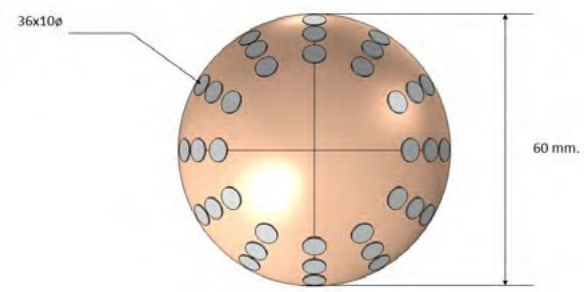


Figura 4. Vista frontal del modelo en 3D

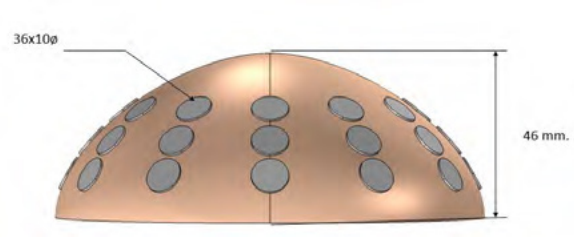


Figura 5. Vista lateral del modelo en 3D

3.2 Parámetros eléctricos del modelo

Para realizar la simulación en el software de COMSOL es necesario definir los parámetros eléctricos de cada elemento, se definió el material como homogéneo. Para el modelo (Figura 6 a Figura 8) se añadieron los siguientes elementos simplificados de la mama, definiendo sus parámetros de conductividad eléctrica - σ (Siemens por metro) con los valores indicados: Tejido adiposo σ = .023 S/m, Carcinoma (Tumor maligno) σ=1.125 S/m, Tejido mamario σ=.225 S/m (Sadleir et al, 2013) y un Tumor Benigno σ=.6 S/m.

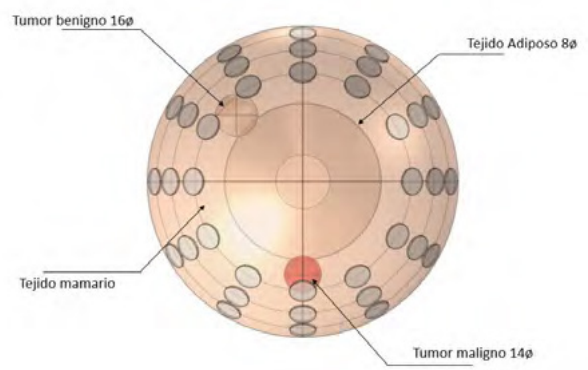


Figura 6. Vista frontal del modelo con elementos añadidos

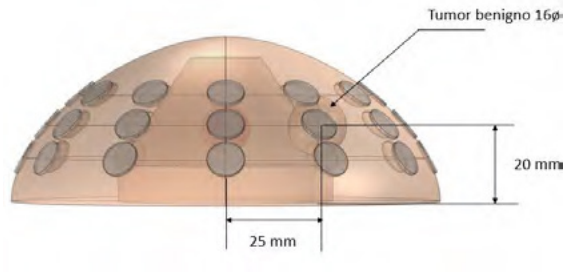


Figura 7. Vista lateral seccion tumor benigno.

ISSN en trámite

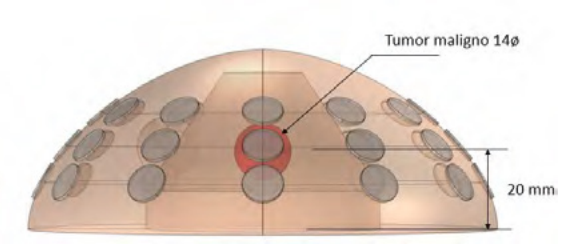


Figura 8. Vista lateral sección tumor maligno.

3.3 Simulación inyección de corriente.

El software de COMSOL permite realizar la simulación del método de TIE (Figura 9) y obtener las mediciones de Voltaje en los electrodos. Los parámetros para la simulación fueron los siguientes: Corriente de inyección .1 µA y una frecuencia de inyección 1000 Hz. El electrodo inyector (Electrodo en rojo) muestra las líneas de flujo y el sentido de la corriente (Flechas rojas) hacia el electrodo de referencia (Electrodo en azul). La corriente viaja dentro de la mama en dirección al electrodo de referencia, en bajas frecuencias el flujo de corriente seguirá el camino que menos resistencia tenga y evitará los elementos que presentan mayor impedancia como los tumores.

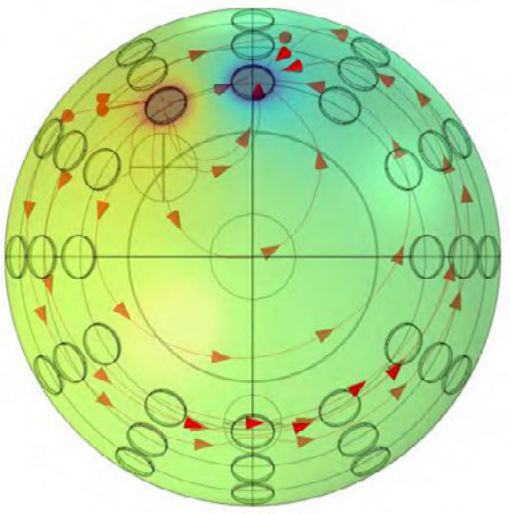


Figura 9. Flujo de corriente en el modelo

De manera nativa en el software de COMSOL se requiere seleccionar de manera manual el electrodo inyector y el electrodo referencia para cada iteración de la medición, para solucionar este inconveniente y realizar el barrido de manera automática se utilizó el software de MATLAB que toma el rol de sistema de control (Designa el electrodo inyector y el electrodo referencia) y funciona como un sistema de almacenamiento (Registra las mediciones de voltaje de cada electrodo).

3.4 Reconstrucción

La reconstrucción de imagen se obtuvo con ayuda del software EIDORS (del inglés Electrical Impedance Tomography and Diffuse Optical Tomography Reconstruction Software) que es un conjunto de algoritmos gratuitos para el modelador directo e inversión de la Tomografía de Impedancia Eléctrica (TIE) y la Tomográfica Óptica basada en la difusión, con aplicaciones médicas e industriales (EIDORS, 2022). Se utilizó un comando básico de reconstrucción en EIDORS con los siguientes comandos (Adler et al, 2015).

Data: Vector de mediciones obtenidas de la simulación.

- A = mk_common_model (Data): Genera un modelo inverso TIE del vector Data. Se debe indicar el tipo de mallado y el número de electrodos. La lista completa de modelos inversos puede encontrarse en la página de EIDORS.
- B= calc_jacobian_bkgnd (A): Calcula la imagen donde se desplegará la información del modelo inverso. Utiliza el método Jacobiano como método de reconstrucción.
- C= fwd_solve (B): Calcula el voltaje de referencia de la imagen.
- D= inv_solve (A, B, Data). Resuelve el problema inverso, genera la reconstrucción a partir del modelo inverso y el vector de mediciones obtenidas de la simulación (Data).
- E= show_fem (D): Muestra en MATLAB como un objeto la figura resultante.

Al utilizar las mediciones de COMSOL almacenadas en MATLAB (Data) para la reconstrucción con el software de EIDORS, se presentan algunos ejemplos de imágenes generadas (Ver Figura 10).

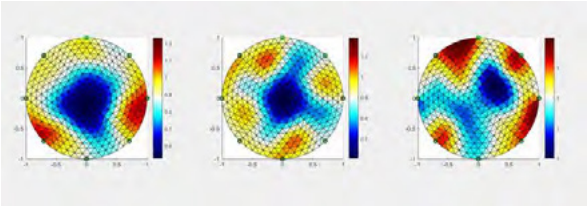


Figura 10. Ejemplos de reconstruccion con el software EIDORS

ISSN en trámite

4. RESULTADOS

Una ventaja de la simulación en comparación a un sistema físico es la capacidad de obtener mediciones de los distintos niveles. Los electrodos son capaces de medir o funcionar como inyectores. Por lo que existe la posibilidad de tener mediciones entre niveles. En la Figura 11 se muestra una matriz de reconstrucciones según el nivel en el cual se aplicó la inyección cuadrapolar.

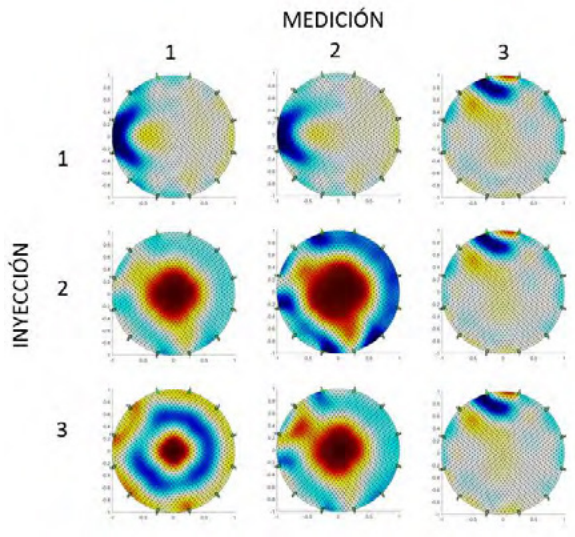


Figura 11. Matriz de reconstrucciones.

Al usar la reconstrucción más significativa de la matriz (Figura 12) se muestra la reconstrucción basada en el modelo inicial, en esta reconstrucción se sobrepuso el "esqueleto" del modelo con el fin de apreciar la localización de los tumores y su representación en la reconstrucción.

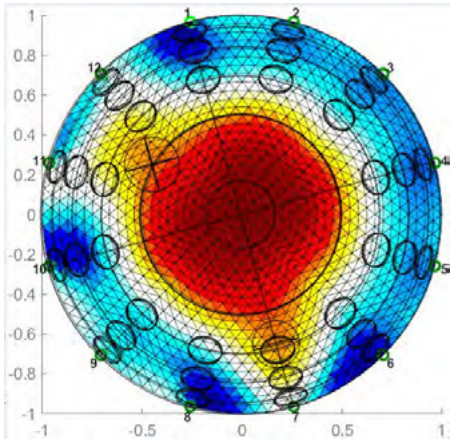


Figura 12. Reconstrucción final de la simulación.

Como complemento y verificación de la calidad de reconstrucción se propuso el uso de un modelo simplificado con un solo carcinoma (σ=1.125 S/m). La posición y la localización del tumor son descritos en la Figura 13.

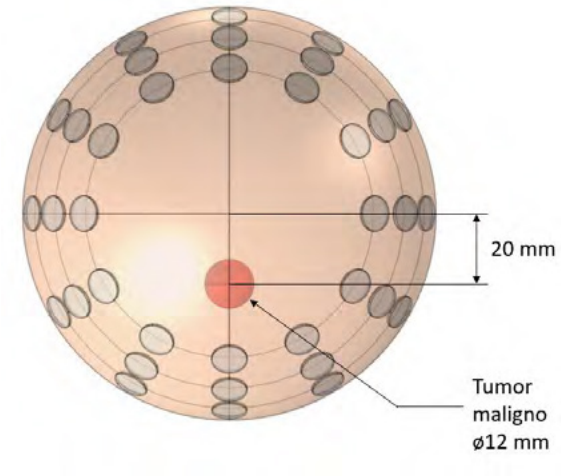


Figura 13. Modelo con un carcinoma.

Al sobreponer el "esqueleto" sobre la reconstrucción (Figura 14), se puede apreciar la calidad de reconstrucción usando como referencia la ubicación y tamaño real del tumor. Se observa un tamaño mayor del tumor en la reconstrucción, aunque solo se trate del único elemento incluido en el modelo de la mama. Evidenciando una de las mayores desventajas de la TIE: la baja resolución.

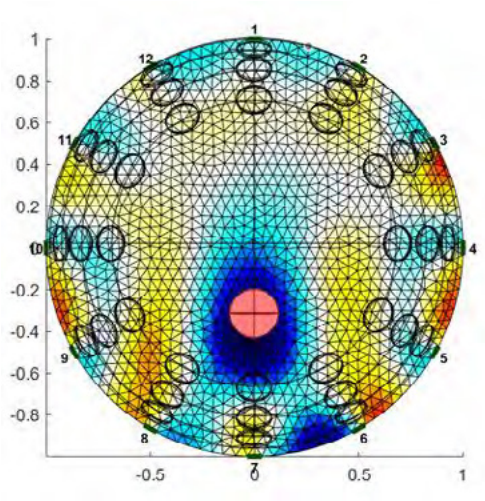


Figura 14. Reconstrucción de modelo simplificado.

ISSN en trámite

5. CONCLUSIONES

Esta propuesta presenta una reconstrucción en 3D de un sistema de tomografía de impedancia eléctrica sin la necesidad de una implementación física. Es importante señalar que la reconstrucción 3D ayuda a mejorar la detección de tumores y su propagación dentro de la mama. Una simulación sirve como un punto de inicio para diseñar un sistema de Tomografía de Impedancia Eléctrica, permitiendo al investigador conocer el número de electrodos, frecuencia de trabajo y valores de inyección necesarios en función de las capacidades de detección de tumor requeridas. Es posible utilizar los valores obtenidos en la simulación para realizar comparaciones entre distintas técnicas de reconstrucción para seleccionar la mejor. Una desventaja importante de que fue demostrada en este artículo es la baja resolución de las reconstrucciones en comparación con otras técnicas de tomografía enfocadas a la detección de tumores cancerígenos.

El uso de COMSOL como motor para la simulación y diseño facilita enormemente la elaboración de modelos usando su interfaz gráfica, con respecto a los modelos tradiciones de generación de simulaciones utilizando líneas de comandos.

Como trabajo a futuro se contempla comprobar los resultados de la simulación contra una etapa experimental.

REFERENCIAS

Adler, A., Lionheart, W. (2006). Uses and abuses of EIDORS: an extensible software base for EIT. Physiological measurement. 27. S25-42. 10.1088/0967-3334/27/5/S03.

Barber, D. C., y B. H. Brown. (1984). Applied potential tomography. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1984: 723.

Cherepenin, V., Karpov, A., Korjenevsky, A., Kornienko, V., Mazaletskaya, A., Mazourov, D., & Meister, D. (2001). A 3D electrical impedance tomography (EIT) system for breast cancer detection. Physiological Measurement, 22(1), 9–18. doi:10.1088/0967-3334/22/1/302.

Cherepenin, V., Karpov, A., Korjenevsky, A., Kornienko, V., Kultiasov, Yury & Ochapkin, Mikhail & Trochanova, Olga Meister, J. (2002). Three-dimensional EIT imaging of breast tissues: System design and clinical testing. Medical Imaging, IEEE Transactions on. 21. 662 - 667. 10.1109/TMI.2002.800602.

EIDORS: Electrical Impedance Tomography and Diffuse Optical Tomography Reconstruction Software. (2021). http://eidors3d.sourceforge.net/

Gómez-Cortés, JC., Díaz-Carmona, JJ., Padilla-Medina, JA., Calderon, AE., Gutiérrez, AIB., Gutiérrez-López, M., Prado-Olivarez, J. (2022). Electrical Impedance Tomography Technical Contributions for Detection and 3D Geometric Localization of Breast Tumors: A Systematic Review. Micromachines. 2022; 13(4):496. https://doi.org/10.3390/mi13040496

Gutierrez-Lopez, M. (2019a). Aplicación de espectroscopia de impedancia eléctrica para el estudio y caracterización de cáncer mamario, Tesis Doctoral.

Gutierrez-Lopez, M., Prado-Olivarez, J., Diaz-Carmona, J., Herrera-Ramírez, C., Gutierrez Gnecchi, J.A., Medina-Sánchez, C.G. (2019b). Electrical Impedance-Based Methodology for Locating Carcinoma Emulators on Breast Models. *Journal of Sensors*.

Holder, D. (2005). *Electrical Impedance Tomography. Methods, History and Applications.* Philadelphia: Institute of Physics Publishing.

Hong, S., Lee, K., Ha, U., Kim, H., Lee, Y., Kim, Y., & Yoo, H. (2015). A 4.9 mΩ-Sensitivity Mobile Electrical Impedance Tomography IC for Early Breast-Cancer Detection System. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50, 245-257.

Instituto Mexicano del Seguro Social. (2021). Cáncer de Mama. http://www.imss.gob.mx/salud-en-linea/cancer-mama.

Rigaud B., Morucci J.P., Chauveau N. (1996). *Bioelectrical impedance techniques in medicine. Part I: Bioimpedance measurement. Second section: impedance spectrometry*. Crit Rev Biomed Eng. 1996;24(4-6):257-351. PMID: 9196884.

Sadleir, R. J., Sajib, S. Z. K., Kim, H. J., In Kwon, O., Woo, E. J. (2013). Simulations and phantom evaluations of magnetic resonance electrical impedance tomography (MREIT) for breast cancer detection. *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 230, pp. 40–49, 201.

Yan, L., Bae, J., Lee, S., Roh, T., Song, K., Yoo, H. (2011). A 3.9 mW 25-Electrode Reconfigured Sensor for Wearable Cardiac Monitoring System. Solid-State Circuits, *IEEE Journal of*. 46. 353 - 364. 10.1109/JSSC.2010.2074350.

Yang, Y., Jia, J. (2017). A multi-frequency electrical impedance tomography system for real-time 2D and 3D imaging. *Review of Scientific Instruments*. 88. 085110. 10.1063/1.4999359.

Zhang, X., Chatwin, C., Barber, D. (2015a). Effective electrode sampling strategies for 3D electrical impedance mammography. *Electronics Letters*. 51. 449-450. 10.1049/el.2014.4454.

Zhang, Xiaolin & Chatwin, Chris & Barber, D. (2015b). A feasibility study of a rotary planar electrode array for electrical impedance mammography using a digital breast phantom. Physiological measurement. 36. 1311-1335. 10.1088/0967-3334/36/6/1311.

ISSN en trámite

Pruebas HALT de temperatura y humedad en un convertidor para aplicaciones fotovoltaicas

Ing. José de Jesús López Romay*. Dr. Hugo Calleja **,
Dr. Rodolfo Vargas Méndez***

*CONACYT TecNM Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, Cuernavaca,Mor., 62490 MEX (e-mail: m20ce090@cenidet.tecnm.mx)
**TecNM Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, Cuernavaca,Mor., 62490 MEX (e-mail: jorge.cg@cenidet.tecnm.mx)
***TecNM Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, Cuernavaca,Mor., 62490 MEX (e-mail: rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: Hoy en día, la mayoría de los productos electrónicos de bajo costo anuncian vidas útiles en el orden de miles de horas. Sin embargo, prevalece la interrogante de cómo verificar la durabilidad y detectar fallas en el diseño para sustituir el eslabón más débil y así hacer el producto más robusto. Se realizó una búsqueda en la cual se encontró que normalmente se identifica a la temperatura y vibración como los factores de deterioro dominantes en los ensambles electrónicos; sin embargo, también es importante considerar a la humedad, ya que usualmente se utilizan componentes higroscópicos, además se muestra un artículo que evidencia el impacto de la humedad en componentes de menor dimensión (en cuanto a volumen). En este artículo se presenta un protocolo de pruebas HALT de temperatura y humedad aplicado al circuito de control de un convertidor elevador. Se analizan las variaciones en la frecuencia de conmutación y ciclo de trabajo al cambiar los valores de los factores de esfuerzo durante las pruebas experimentales, se observó una disminución del ciclo de trabajo y la frecuencia de conmutación al aumentar la temperatura, y un aumento en la frecuencia de conmutación y ciclo de trabajo al disminuir la temperatura, lo anterior es parte fundamental para el desarrollo y conclusión de la tesis de maestría en el CENIDET.

Palabras clave: pruebas HALT, pruebas aceleradas, límites de operación, factor de esfuerzo.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, en los últimos años se alcanzó una capacidad instalada para la generación de electricidad a partir de fuentes renovables cercana a los 2,799 GW (Brandy 2021). Las inversiones en el sector también aumentaron: en 2021 se invirtieron 755,000 millones de dólares para mantener el crecimiento en la capacidad de generación de electricidad (Roca 2022).

En México, la demanda se satisface actualmente con energía de fuentes fósiles, lo cual ofrece una gran oportunidad para la inversión en fuentes renovables. Si se agregan las expectativas de crecimiento, el margen para la implementación de este tipo de tecnología es aún mayor (Secretaría de energía 2016a). La energía solar fotovoltaica es así la fuente de energía eléctrica con más rápido desarrollo, con una tasa de crecimiento anual de 27.2 %. Para 2030, se espera alcanzar los 6,891 MW instalados (Secretaría de energía 2016b).

1.1 Antecedentes

El parámetro "Costo Nivelado de Energía LCOE" (*Levelized Cost Of Energy*) se utiliza para comparar tecnologías de generación de energía. En su forma más sencilla, el LCOE se puede expresar como:

$$LCOE = \frac{C_{TCV}}{E_{TCV}} \quad (1)$$

donde C_{CTV} es el costo total en el ciclo de vida, y E_{TCV} es la energía producida en el mismo lapso (Cambell 2008). En C_{CTV} intervienen el costo inicial, la depreciación, las tasas de descuento y de impuestos, etc. En E_{TCV} intervienen la capacidad nominal del sistema, la tasa de degradación de los paneles, la eficiencia de los convertidores de potencia, la vida útil, etc.

La meta es tener el LCOE más bajo posible. De acuerdo a (1), esto implica minimizar C_{CTV}, y/o maximizar E_{TCV}. Es fundamental entonces obtener aparatos duraderos, lo cual se logra recurriendo a técnicas de maximización de la confiabilidad, entre las cuales figuran las pruebas aceleradas. De acuerdo al objetivo, las pruebas pueden ser de vida acelerada (considerando la ecuación de Arrhenius), o pruebas HALT (*Highly Accelerated Limit Test*; IEC 62506 2013, p. 10) para identificar con rapidez límites y debilidades en un producto.

ISSN en trámite

Las pruebas HALT se aplican para descubrir tanto los defectos latentes en el diseño de un producto como la selección inapropiada de componentes. Para ello, el producto se somete a esfuerzos cuya intensidad va aumentando progresivamente. Por un tiempo solo se consideró a la temperatura como el principal factor de esfuerzo; sin embargo, estudios recientes han demostrado la importancia de considerar también a la humedad. En (Conseil et al., 2014) se estudió la fiabilidad frente a la corrosión de los productos electrónicos como un factor clave para la industria electrónica; además, se mencionó que la temperatura, en combinación con la humedad, ocasiona las fallas por corrosión en las PCB *(Printed Circuit Board)*. En (Zhang et al., 2012) se determina que, para combinaciones de 85°C/85% HR *(Humedad Relativa)*, la confiabilidad de los convertidores electrónicos se degrada; además, se evidenciaron cambios considerables en la integridad de los componentes.

1.2 Justificación

Hoy en día, muchos productos electrónicos de bajo costo anuncian vidas útiles en el orden de miles de horas. Sin embargo, prevalece la interrogante de cómo verificar la durabilidad e identificar fallas en el diseño. Separar una muestra de un lote de producción y ponerla a funcionar hasta que falle es poco práctico. Las pruebas HALT se aplican como estrategia para apresurar el envejecimiento de los productos y determinar su vida útil en tiempos cortos. Estas pruebas también ayudan a identificar puntos débiles en el diseño y construcción del producto.

Considérese un convertidor CD/CD del tipo elevador, con valores particulares en el inductor de entrada y el capacitor de salida. El rizo de corriente a la entrada, el rizo del voltaje de salida y la ganancia del convertidor dependen de la frecuencia de conmutación f_S y del ciclo de trabajo D. Es común emplear un circuito de propósito específico para controlar al interruptor del convertidor; así pues, los cambios en este circuito que alteren ya sean a f_S o a D se reflejarán en el comportamiento global del convertidor. Los cambios pueden deberse a la temperatura y a la humedad.

1.3 Objetivo

Aplicar una secuencia de pruebas HALT al circuito de gobierno de un convertidor CD/CD para aplicaciones FV, considerando a la humedad y a la temperatura como factores de esfuerzo.

2. HUMEDAD EN CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

La absorción de humedad en materiales higroscópicos se rige por la ley de Fick. La absorción es fuertemente dependiente de la temperatura. Al principio, la absorción sigue una respuesta de primer orden y, eventualmente, llega a un valor de saturación, el cual depende de la temperatura, aunque no de manera lineal (Mavinkurve et al.,2016). Por otro lado, el tiempo para alcanzar la saturación depende del volumen del material: como se ilustra en la figura 1, hay diferencias superiores a un orden de magnitud. Esto sugiere que, en un proceso de deterioro relacionado con la humedad, serán los componentes pequeños (en cuanto a volumen) los primeros en fallar.

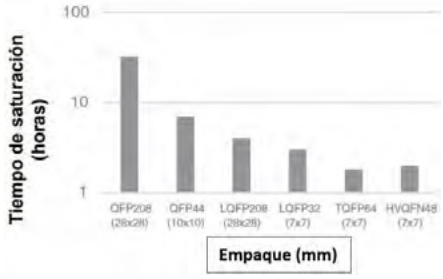
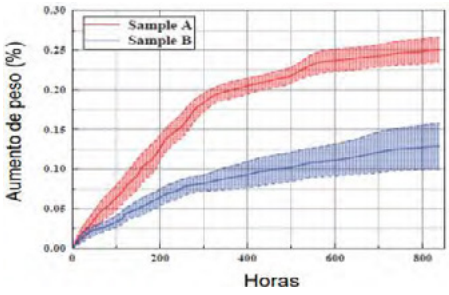


Figura 1. Tiempo transcurrido a la saturación, a T = 130°C (adaptado de (Mavinkurve et al.,2016)).

2.1 Humedad en capacitores de película

Por razones económicas, los capacitores de película en configuración radial normalmente se encapsulan en "cajas" de plástico abiertas por una de las caras. En el interior de la caja se insertan los rollos de película devanados con sus terminales correspondientes, y a continuación se agrega resina epóxica hasta ocupar la totalidad del volumen de la caja. Si bien se obtiene un costo muy reducido en comparación con los empaques metálicos, una desventaja de esta estructura es que la resina es permeable a la humedad, lo cual eventualmente produce la corrosión de las terminales y de la capa de metalización. La metalización pierde conductividad como resultado de la oxidación, lo que se refleja como una disminución del área de las placas y, en consecuencia, una disminución de la capacitancia (Valentine et al.,2019).



ISSN en trámite

Figura 2. Comportamiento del aumento de peso en función del tiempo bajo prueba (adaptada de (Li et al. 2021)).

En (Li et al. 2021) se describen las pruebas de temperatura y humedad a dos capacitores de características similares (0.47 µF, 305 V_{RMS}), pero con diferencias en la resina epóxica empleada para encapsularlos. El comportamiento del aumento de peso en función de la temperatura, para ambas muestras, se muestra en la figura 2. La densidad de la resina en la muestra B es superior a la utilizada en la muestra A, en esta última con menor densidad. Debido a la mayor densidad, el proceso de corrosión es más lento en la muestra B lo cual implique que, para condiciones ambientales similares, exhibirá una disminución menor en la capacitancia.

3. PRUEBAS HALT

Un elemento o ensamble electrónico exhibe una cierta robustez R, la cual es superior a la intensidad de los esfuerzos E_N que normalmente aparecen en una aplicación (figura 3). En las pruebas HALT, los esfuerzos se aceleran artificialmente hasta que se produzca un traslape entre los esfuerzos y la robustez, lo que desemboca en una falla del producto.

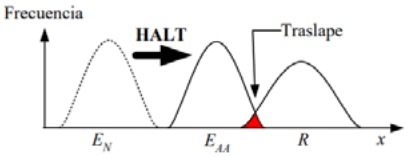


Figura 3. Principio del proceso de pruebas de límite muy aceleradas (adaptado de (Silverman,2006)).

El proceso es efectivo para identificar las debilidades del producto, para el cual existen varios límites, como se muestra en la figura 4 (Silverman 2006). En ella, el factor de esfuerzo puede ser la temperatura, y habrá tanto límites superiores como inferiores. Aparecen primero los límites inferior y superior de las especificaciones LIE y LSE respectivamente, los que dependen de la aplicación. Están después los límites operativos inferior y superior LIO y LSO: el dispositivo sigue operando normalmente, aunque es posible que no satisfaga totalmente los criterios de funcionalidad. Por último, se encuentran los límites de destrucción LID y LSD, en los que el prototipo ya no recupera la funcionalidad, aunque se retorne a valores que se encuentren dentro de los límites de las especificaciones.



Figura 4. Límites en un producto (adaptado de (Silverman,2006)).

4. CIRCUITO SOMETIDO A PRUEBAS

4.1 Especificaciones del convertidor

Se utilizó un convertidor elevador diseñado para operar en modo de conducción continua, con las siguientes características:

- Voltaje de entrada V_i=17 V
- Voltaje de salida V_o=48 V
- Frecuencia de conmutación 100 kHz
- Potencia 100 W

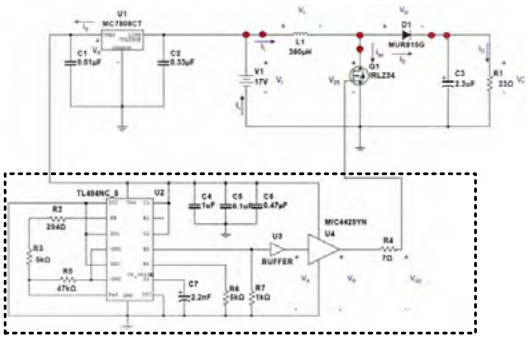


Figura 5. Diagrama completo del prototipo.

El tiempo para alcanzar la saturación en humedad de un componente electrónico depende principalmente de las dimensiones del material. Lo anterior es relevante debido a que normalmente en un prototipo se utilizan componentes de diferentes medidas: de menor dimensión, como los circuitos integrados, y dispositivos voluminosos, como transistores y diodos de potencia. Esto sugiere que, en un proceso HALT, serán los componentes de menor dimensión los primeros en presentar una falla parámetrica; por lo anterior, se sometió el circuito de control a las pruebas HALT. El circuito de control aparece en el interior del cuadro punteado, en la figura 5.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Planeación de pruebas HALT

En el proceso HALT, el producto se somete a esfuerzos cuya intensidad aumenta progresivamente. Para un valor dado de humedad relativa, se aplican dos secuencias de temperaturas, primero en aumento a partir de la ambiental, y después en disminución. Una vez terminadas las secuencias, se modifica el nivel de humedad y se repiten las secuencias. Si se detecta

ISSN en trámite

una falla, se retorna a las condiciones previas, para determinar si se está ante una falla reversible, o catastrófica.

Las secuencias que se aplicaron son las siguientes:

A: esfuerzos con temperaturas en aumento de 10°C por escalón, a partir del valor de 30°C hasta alcanzar 70°C. El nivel de humedad fue el ambiental en el momento de la prueba (HR = 35%).

B: esfuerzos con temperaturas en disminución de 10°C por escalón, a partir de 20°C hasta -13°C (por detalles técnicos no se logró llegar hasta el valor de -20°C). El nivel de humedad fue también el ambiental en el momento de la prueba (HR = 35%).

C: esfuerzos con temperaturas altas, de 60°C hasta 90°C. El nivel de humedad fue el ambiental en el momento de la prueba (HR = 35%).

D: esfuerzos con temperaturas en aumento de 10°C por escalón, a partir de 30°C hasta alcanzar 90°C. El nivel de humedad se aumentó a HR = 50%.

E: esfuerzos con temperaturas en disminución, de 20°C hasta -9.9°C. El nivel de humedad fue HR = 50%.

Las secuencias se muestran en las figuras 6 a 10, el tiempo utilizado por escalón se registró como t_{PRUEBA} (tiempo de prueba en minutos) en la tabla 1 a la 5.

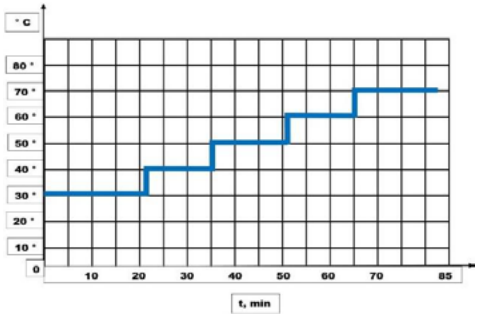


Figura 6. Secuencia A

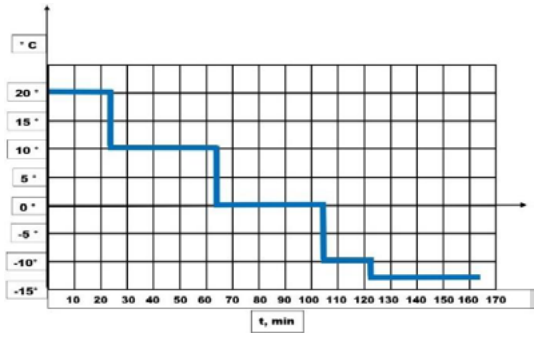


Figura 7. Secuencia B

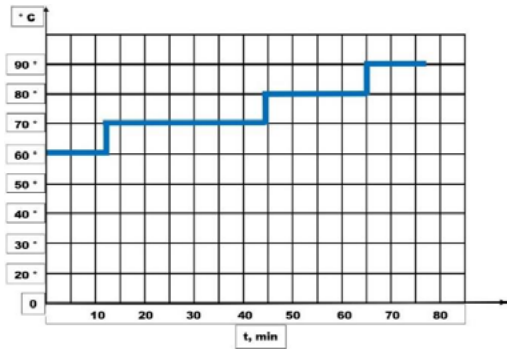


Figura 8. Secuencia C

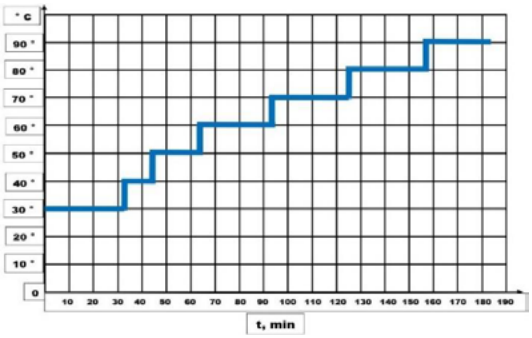


Figura 9. Secuencia D

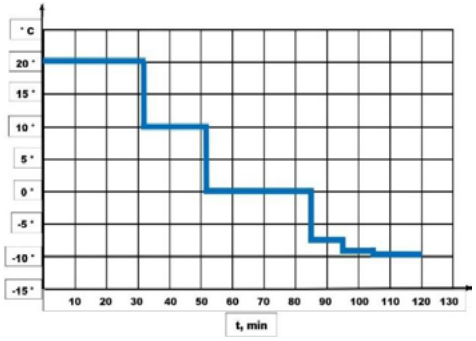


Figura 10. Secuencia E

5.2 Ejecución de las secuencias HALT

Se ejecutaron cinco secuencias, primero se empezó con una temperatura cercana al ambiente e incrementándola 10°C por escalón hasta alcanzar 70°C (Secuencia A). Se monitoreó la frecuencia de conmutación f_S y el ciclo de trabajo D del TL494 para evidenciar si ocurría una falla paramétrica, y cambios significativos en f_S y D durante el incremento de la temperatura con dos diferentes valores de humedad relativa.

ISSN en trámite

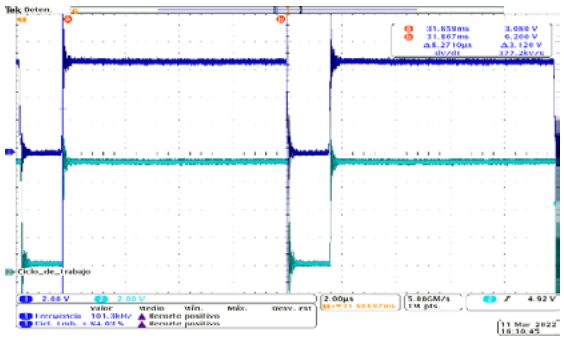


Figura 11. Ancho de pulso del TL494 sometido a -9.9°C y 83.7 % HR

Al iniciar la secuencia E se registraron f_S = 100.492 kHz y D = 69.7 % con T_P = 20°C y HR = 75.9%. Al final de la secuencia mencionada, con T_P = – 9.9°C y HR = 83.7 %, se registró un aumento en f_S de 101.102 kHz y en D, cuyo valor nuevo fue de 83.62 %. Las formas de onda se muestran en la figura 11.

5.3 Resultados obtenidos de las secuencias HALT

Los resultados de las pruebas se concentran en las tablas 1 a 5. En ellas se incluye el tiempo de tomó llegar a la temperatura final del escalón

Tabla 1. Secuencia A, de 30°C *a* 70 °C con HR = 35%

t_{PRUEBA} (minutos)	T_P (°C)	HR (%)	f_S (kHz)	*D (%)*
22	30	35	100.2	66.97
13	40	34.3	99.70	62.71
16	50	33.7	99.27	58.89
14	60	34.8	98.90	55.29
17	70	36.2	98.70	52.12

Tabla 2. Secuencia B, de 20°C a -13°C, con HR = 35% HR

t_{PRUEBA} (minutos)	T_P (°C)	HR (%)	f_S (kHz)	*D (%)*
23	20	35	100.49	70.69
40	10	41.4	100.70	75.00
41	0	65.7	101.11	79.56
18	-10	76.2	101.31	83.16
40	-13	74.2	101.72	84.11

Tabla 3. Secuencia C, de 60°C a 90°C, con HR = 35%

t_{PRUEBA} (minutos)	T_P (°C)	HR (%)	f_S (kHz)	*D (%)*
12	60	35	100.100	55.29
32	70	36.4	98.522	52.12
21	80	36.1	98.328	48.48
12	90	34.8	97.181	45.54

Tabla 4. Secuencia D, de 30°C *a* 90 °C con HR = 50% HR

t_{PRUEBA} (minutos)	T_P (°C)	HR (%)	f_S (kHz)	*D (%)*
31	30	50	100.128	66.54
12	40	47.9	99.482	62.68
20	50	49.1	99.285	59.05
29	60	50.4	98.697	55.34
33	70	52.5	98.125	51.78
32	80	50.9	97.551	48.74
26	90	50.4	96.983	45.54

Tabla 5. Secuencia E, de 20°C *a* – 9.9 °C con HR = 50%

t_{PRUEBA} (minutos)	T_P (°C)	HR (%)	f_S (kHz)	*D (%)*
31	20	75.9	100.492	69.70
20	10	73.9	100.897	74.97
33	0	75.2	101.102	79.57
11	-7.1	71.2	101.102	81.39
9	-9.7	77.5	101.102	83.41
16	-9.9	83.7	101.102	83.62

En la figura 12 se muestra la interpolación de los resultados de las secuencias A y B, y una aproximación lineal del comportamiento de f_S. Si se exceptúan los valores a 60°C y 90°C de la secuencia B, se aprecia que la frecuencia exhibe un comportamiento muy lineal que se puede aproximar con:

$$f_S = \left(-0.0351 \frac{kHz}{°C}\right) T + 101.0909\, kHz \quad (2)$$

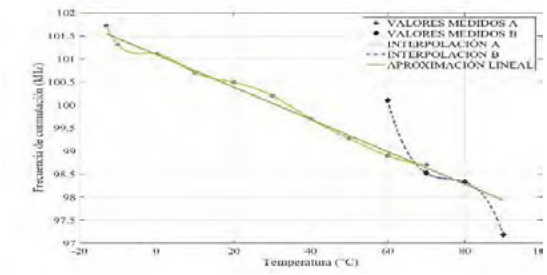


Figura 12. Interpolación de los valores de la frecuencia obtenidos en la secuencia A y B

En la figura 13 se muestra la interpolación de los resultados de la secuencia D, y una aproximación lineal del

ISSN en trámite

comportamiento de f_S. Se aprecia que la frecuencia obtiene un comportamiento muy lineal que se puede aproximar con:

$$f_s = \left(-0.0351 \frac{kHz}{°C}\right) T + 101.0909\, kHz \quad (3)$$

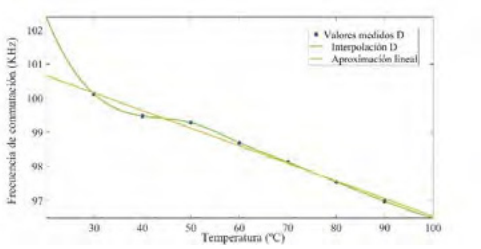


Figura 13. Interpolación de los valores de la frecuencia obtenidos en la secuencia D

En las figuras 14 y 15 se muestran el comportamiento del ciclo de trabajo y la frecuencia de conmutación de las secuencias D y E. A medida que la temperatura aumenta, el ciclo de trabajo y la frecuencia de operación disminuyen (secuencia D); en contraparte, a una temperatura en disminución a partir de 20°C, D y f_S aumentan (secuencia E).



Figura 14. Tendencia del ciclo de trabajo (*D%)* y la frecuencia de conmutación (f_S=kHz) a una temperatura en aumento

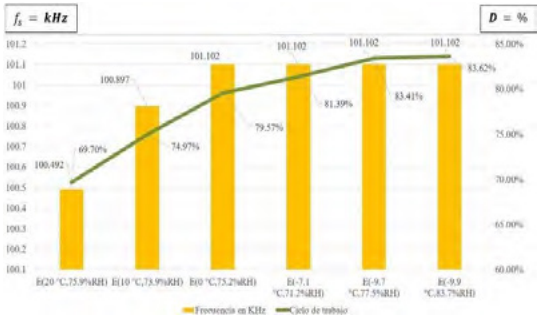


Figura 15. Tendencia del ciclo de trabajo (*D%)* y la frecuencia de conmutación (f_S=kHz) a una temperatura en disminución

Se muestran resultados de simulación del convertidor elevador en las figuras 16 a 18. Se ilustra el voltaje de salida a los diferentes valores de f_S de las pruebas HALT. A 0.5 ms de operación, con f_S = 100 kHz el valor pico de voltaje fue de 53 V; a f_S = 96.983 kHz fue de 51 V, y a f_S = 101.72 kHz de 54.6 V. Para las frecuencias mencionadas, los valores de la amplitud pico a pico del rizo de voltaje de salida en régimen permanente fueron: 6 V (recuadro en figura 16), 5.4 V (en la figura 17) y 6.3 V (en la figura 18).

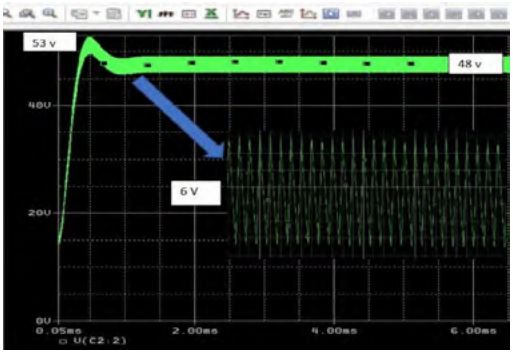


Figura 16. Voltaje de salida del convertidor elevador a una f_S = 100 kHz

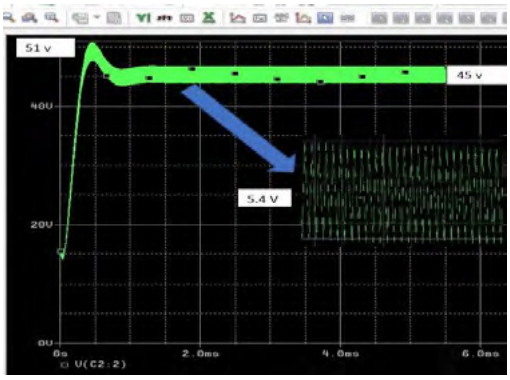


Figura 17. Voltaje de salida del convertidor elevador a una f_S = 96.983 kHz (90°C, 50 % *HR*)

ISSN en trámite

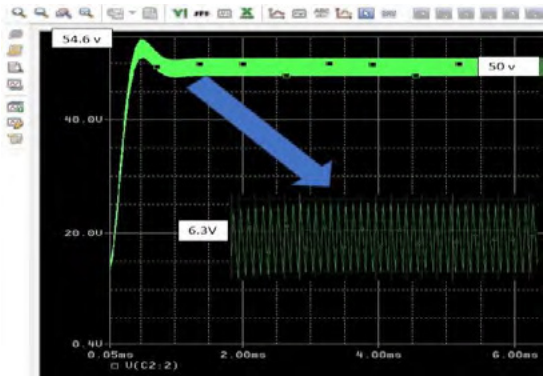


Figura 18. Voltaje de salida del convertidor elevador a una f_S = 101.72 kHz (−13℃, 82.5 % HR)

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados, a una disminución en la temperatura desde 20°C, correspondieron aumentos en la frecuencia de conmutación y en el ciclo de trabajo en el TL494CN; en contraste, con un aumento en la temperatura a partir de 20°C, se observó una disminución en la frecuencia y en el ciclo de trabajo. Cabe destacar que con −9.9℃ y 50% HR se obtuvo una falla paramétrica reversible.

La falla se atribuye al capacitor que se encuentra conectado en el pin Ct del TL494CN como factor principal en los resultados, ya que la deriva de este componente afecta directamente a la frecuencia de conmutación y al ciclo de trabajo. Es relevante mencionar que, aunque el circuito integrado está especificado para operar correctamente hasta una temperatura de 70°C, se evidenció que el límite operativo se encuentra a 90°C debido a que funcionó correctamente.

No hubo discrepancias significativas en los resultados de D y f_S obtenidos con dos valores distintos de humedad (35% y 50%) pero a una misma temperatura. En un par de escalones se registraron diferencias poco notables; por ejemplo: con 70°C y HR = 36.4% se registraron 98.522 kHz de frecuencia y 52.12% de ciclo de trabajo; a la misma temperatura, pero con HR = 52.5 % HR, se registraron 98.125 kHz de frecuencia y 51.78 % de ciclo de trabajo. Con esta comparación se infiere que, a un mayor porcentaje de humedad relativa, se tiene un mayor impacto (un mayor aumento o disminución, según sea el caso) en la frecuencia de conmutación y en el ciclo de trabajo del TL494CN.

Adicionalmente, es importante resaltar que, por lo general, las fichas técnicas de los componentes no indican el comportamiento con respecto a la humedad. Este trabajo se orienta también a subsanar esta falta de información.

REFERENCIAS

Brandy, D., (2021). Nuevo récord mundial de capacidad energética renovable en 2020 [en línea]. *IRENA – International Renewable Energy Agency*. [Consultado el 22 de marzo de 2022]. Disponible en: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/PressRelease/2021/Apr/IRENA-Capacity-Stats2020_PressRelease_ Spanish.pdf ?la=en&hash=3B4B1961FE5181FED7E09B4DCC2AC3F3E852F722.

Cambell, M., (2008). The drivers of Levelized Cost of electricity for utility-scale photovoltaics [en línea]. [Consultado el 8 de marzo de 2022]. Disponible en: http://large.stanford.edu/.

Conseil, H., Jellesen, M. S. y Ambat, R., (2014). Experimental study of water absorption of electronic components and internal local temperature and humidity into electronic enclosure. *IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)* [en línea]. 355–359. Disponible en: doi: :10.1109/EPTC.2014.7028356.

Gray, K. A. y Paschkewitz, J. J., (2016). *Next generation HALT and HASS: robust design of electronics and systems*. WILEY.

IEC 62506: métodos de prueba acelerada de productos. Ginebra: International Electrotechnical Comission.2013.

Li, Z., Li, H., Qiu, T., Lin, F. y Wang, Y., (2021). Moisture induced weight gain relation to capacitance loss characteristic of film capacitors under harsh enviroment. *IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)* [en línea]. 1–4. Disponible en: doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510996.

Mavinkurve, A., J. L. M., Martínez, L. y Van Soestbergen, M., (2016). Moisture absorption by molding compounds under extreme conditions: impact on accelerated reliability tests. *Microelectronics Reliability* [en línea]. 64, 254–258. Disponible en: doi: 10.1016/j.microrel.2016.07.105.

Roca, J. A., (2022). La inversión mundial en tecnologías limpias en 2021 [en línea]. *El Periodico de la Energía con información diaria sobre energía eléctrica, eólica, renovable, petróleo y gas, mercados y legislación energética.* [Consultado el 22 de marzo de 2022]. Disponible en: https://elperiodicodelaenergia.com/la-inversion-mundial-en-tecnologias-limpias-alcanzo-un-record-de-755-000-millones-de-dolares-en-2021/.

Secretaría de energía, (2016a). Prospectiva de energías renovables 2016-2030 [en línea]. [Consultado el 26 de febrero de 2022]. Disponible en: http://www.gob.mx.

Secretaría de energía, (2016b). Prospectiva de talento del sector energía. [en línea]. [Consultado el 26 de febrero de 2022]. Disponible en: http://www.gob.mx.

Silverman, M., (2006). HALT vs. ALT: when to use which technique? En: *2006 annual reliability and maintainability symposium, Newport Beach, Ca, USA*. pp. 310–312.

Valentine, N., Azarian, M. y Pecht, M., (2019). Metallized film capacitors used for EMI filtering. *A reliability review, Microelectronics Reliability* [en línea]. **92**, 123–135. Disponible en: doi: 10.1016/j.microrel.2018.11.0037).

Zhang, X. y he, x., (2012). The reliability evaluation of the bonding wire in the DC/DC power under the environment of humidity. *13th International Conference on Electronic Packaging Technology & High-Density Packaging* [en línea]. 1357–1359. Disponible en: doi: 10.1109/ICEPT-HDP.2012.6474858.

ISSN en trámite

Arquitectura para la Implementación de Videojuego Frogger en una Tarjeta de Desarrollo con FPGA

Yamil David Mendoza Murcia*. Ricardo Francisco Martínez González.**
Luis Angel Torres Martínez.* Juan Francisco Mejía Pérez.*

**Tecnológico Nacional de México campus Veracruz, Veracruz, VER 91897 MEX.*
***Tecnológico Nacional de México campus Veracruz, Veracruz, VER 91897 MEX.*
(e-mail: ricardo.mg@veracruz.tecnm.mx)

Abstract: El presente proyecto realiza una adaptación del videojuego conocido como Frogger, en dicho juego se pretende que una rana llegue a su hogar de forma segura. Para el proyecto se desarrollaron diversos elementos, mismo que en conjunto realizaron la función deseada. Entre los elementos generados se encuentra el barrido en pantalla de los objetos desplegados, y para controlar la posición de cada uno de ellos se realiza mediante el manejo de condicionales. Como parte inherente del juego es necesario presentar obstáculos, o retos, al jugador con el fin de mantener su interés, y estos llegan en forma de vehículos que el jugador debe evitar para cumplir su objetivo de llevar a la rana de un lado a otro de la calle.

Keywords: Controlador VGA, codificación VHDL, implementación de videojuego, Frogger, diseño en FPGA

1. INTRODUCCIÓN

Los videojuegos tienen una gran importancia en el desarrollo de nuevas tecnologías, principalmente en el área de desarrollo de imágenes virtuales [Tieri y otros, 2018][Segarra, 2016], el procesamiento digital de señales y también de la pedagogía [Cuello, 2006]. Los videojuegos originalmente iniciaron con un programa de computo en donde dos jugadores interactuaban en la simulación de un partido de tenis. El desarrollo de los videojuegos fue evolucionando, hasta que en la actualidad hay compañías especializadas en su producción [Young, 2018] [Nieto, 2006]. En la concepción original, los videojuegos constaban de imágenes superpuestas, lo que ocasionaba un alto consumo de memoria. Posteriormente, en un juego denominado Space Invaders, se empezaron a ocupar objetos, los cuales eran capaces de moverse de forma independiente [Belli y López, 2008] [Blasquez y Leblanc, 2018]. Este avance redujo el consumo de memoria, ya que no se requería refrescar toda la pantalla, sino únicamente los objetos que se movían; a dichos objetos se les conoce por el nombre de sprites [González López, 2014].

En cuanto a la herramienta de procesamiento, los primeros videojuegos utilizaban procesadores de ocho bits. En dichos procesadores la única representación numérica que está disponible es aquella de punto fijo [Ferrer Pereira, 2020] [Salazar, 2000]. Posteriormente, aparecieron los procesadores de dieciséis bits, y con ello, una mayor profundidad en los colores usados, así como un mayor número de objetos en movimiento [Lek Boada, 2021]. El siguiente gran salto de los videojuegos apareció con los procesadores de 32 bits y la representación numérica de punto flotante [Rodríguez et al, 2018]. Esta representación permite que los movimientos fueran más fluido y reales, así como la incursión de los polígonos para representar los objetos [Sangacha y René, 2016].

En este documento se presenta la creación de un videojuego a modo de consola. La plataforma sobre la cual se desarrolla el proyecto es una tarjeta de desarrollo con FPGA DE0 de la marca Terasic. Dicha tarjeta cuenta con varios elementos básicos necesarios para la creación del sistema, entre ellas un convertidor digital analógico para VGA, de las siglas en inglés para arreglo gráfico de vídeo, de ocho bits; que será usado como dispositivo de salida del sistema. Así como de diversos botones e interruptores que servirán a modo de controles en el juego.

2. DESCRIPCIÓN DEL JUEGO A IMPLEMENTAR

La intención de este proyecto fue la implementación del emblemático videojuego de 1981, denominado Frogger. La intención del juego original es guiar a una rana a través de una calle llena de vehículos en un tiempo límite, para que ésta llegue a su hogar [Moriarty, 1984]. En la versión desarrollada, se tiene un arroyo vehicular de tres carriles, y el juego lleva la cuenta de las veces en que la rana cruza en ambas direcciones; también, no hay límite de tiempo para hacerlo. Lo que sí está presente es un aumento de la dificultad del juego cada vez que se logra cruzar con éxito la calle.

2.1 Configuración del arreglo para gráficos de vídeo (VGA)

La configuración que se ocupa de video es VGA, la cual consta de impresión en pantalla controlada a través de tiempos. Como se muestra en la Figura 1, el primer tiempo que se debe cumplir

ISSN en trámite

es en el que se mandan las imágenes de la primera línea horizontal. Posteriormente, entra un tiempo de blanqueo; es ahí en donde se obtiene su pulso de sincronía horizontal, y de igual forma en el lado vertical.

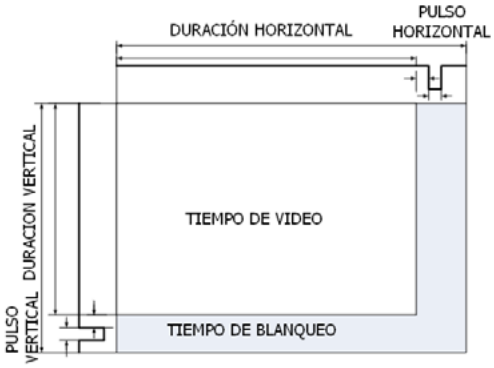


Figura 1. Descripción de la configuración de la señal VGA.

3. DISEÑO DE LA PLATAFORMA DE JUEGO

El sistema consta de dos elementos básicos, el primero es un PLL que funciona como un divisor de frecuencias. El PLL, o phase-locked loop, se utiliza para lograr la frecuencia necesaria para el despliegue de las imágenes en una pantalla VGA. Adicionalmente, se creó un modelo en donde se inserta la lógica del videojuego, así como las necesidades del mismo. Por último, todos los elementos desarrollados serán integrados en una sola entidad.

3.1 Creación de la entidad para la sincronía del VGA

La entidad empleada para enviar las señales al VGA tiene dos entrada y cinco salidas. Las entradas corresponden a la entrada de reloj, y a una entrada de reinicio. Por otro lado, en las salidas se tienen los pulsos de sincronía horizontal y vertical, así como los valores vectoriales para cada uno de los componentes de color; es decir tres bits para cada color, dando un total de 9 bits para la representación de los colores. En el Código 1 se presenta la declaración de la entidad empleada.

Código 1. Declaración de la entidad sincronía

```
entity sincronia is port(
clk2, x: in std_logic;
R, G, B: out std_logic_vector (0 to 3);
hs, vs: out std_logic);
end sincronia;
```

3.2 Configuración de las señales de control para el videojuego

Como se menciona en líneas anteriores, en la transmisión de imágenes por VGA es necesario tener un ancho y un alto, los cuales están definidos por las señales *xp* y *yp*. Posteriormente, tanto en el horizontal como en la vertical debe haber un excedente en el tamaño, donde se inserta la señal de sincronía. El primero de estos excedentes se presenta en el lado horizontal, y corresponde a la señal *hfp*; la cual indica el espacio entre el final de la impresión de pantalla, y el pulso de sincronía que está determinado por la señal *hsync*. De igual manera, el tamaño del horizontal en pixeles se encuentra determinado por la señal *hbp*.

Luego se establecer la sincronía horizontal, se debe de establecer la sincronía vertical; para ello se tiene la señal *vfp*, que define el espacio entre la señal de sincronía y la de impresión. *vsync* para el tamaño de la señal de sincronía, y *vbp* para la distancia entre la sincronía y el fin de impresión.

Posteriormente, se declaran los valores máximos de las dimensiones del VGA; en donde *maxx* es la suma de la señal de video *xp* y todas las distancias horizontales. Mientras que *maxy* es la suma de todas las distancias verticales. Todas las señales dadas hasta este momento serán ocupadas como constantes, lo que facilitará si en el futuro se requirieran cambios en la configuración del vídeo.

Por su parte, las señales *posicionh* y *posicionv* serán las señales de barrido que se utilizarán; con ellas, luego de cada pulso de reloj, la sincronía se desplazará pixel por pixel, cubriendo por completo la imagen que se desea plasmar. La señal *xrana* y *yrana* representan la posición superior izquierda del lugar donde se encuentra la rana en el juego. Para esta implementación ambas señales tienen un valor de veinte, es decir que la rana tendrá un área de 400 pixeles.

Las señales *ytope* y *xtope* son banderas, y *xcarro* e *ycarro* son las posiciones horizontal y vertical en donde se encuentra el primer obstáculo, lo mismo pasa con *xcarro1* e *ycarro1* son las posiciones del segundo obstáculo, así como con *xcarro2* e *ycarro2* pertenecen al tercer obstáculo.

También existen contadores de un segundo, denominados *contador*, *contador2*, *contador3* y *contador4*. En la tabla 1 se presenta las configuraciones utilizadas para las señales mencionadas con anterioridad.

Tabla 1. Configuración inicial para las señales empleadas

Señales auxiliares para la sincronía		Señales para los elementos en pantalla	
Señal	Valor inicial	Señal	Valor inicial
xp	1280	xrana	20
yp	1024	yrana	20
hbp	248	xtope	0
hfp	48	ytope	0
hsync	112	xcarro	267
vbp	38	ycarro	892
vfp	1	xcarro1	567
vsync	3	ycarro1	892
maxx	xp+hbp+hfp+hsync	xcarro2	867
maxy	yp+vbp+vfp+vsync	ycarro2	892
posicionh	0	contador	0

ISSN en trámite

posicionv	0	contador2	0
-	-	contador3	0
-	-	contador4	0
-	-	scorew	0
-	-	scorel	0

3.3 Barrido de la pantalla

Para iniciar el funcionamiento del bloque de sincronía, primero se necesita declarar el barrido de los pixeles dentro de la pantalla; para realizarlo se sigue el proceso con contadores. El bloque de sincronía se encarga de que por cada pulso de reloj, el barrido horizontal aumente en una posición cuando sea menor al tamaño máximo establecido por las dimensiones. En el caso de que la cuenta sobrepase la dimensión establecida, entonces la cuenta se verá reiniciada a cero, y se aumentará en una posición el valor del barrido vertical. La cuenta del barrido vertical se seguirá aumentando hasta el momento cuando se alcance establecido para esa dimensión, entonces la cuenta será regresada a su valor inicial de cero. Es importante mencionar que cuando el valor del barrido vertical se regrese a cero, entonces se habrá realizado una impresión en la pantalla. Todo el proceso de barrido se puede observar en el Código 2 de la sección ANEXOS.

3.4 Impresión de los objetos en pantalla

Para hacer la impresión de la imagen del instante en el juego, lo que se necesita hacer primero es iniciar un nuevo proceso, en el que se hará la impresión y el movimiento de todos los objetos en el juego. Dicho proceso se encargará de dar los valores de *R*, *G* y *B* necesarios en cada momento. Para iniciar, se realiza la rana y a los vehículos, a través de la definición de su posición en el juego. En la primera línea de las condiciones de impresión, mostrado en el Código 3, se asigna el tamaño a la rana, siendo está de sesenta por sesenta pixeles; mientras que, en las siguientes líneas, se detallan la boca y los ojos. En las siguientes condiciones se imprimen los vehículos, los cuales tendrán un tamaño de 175 x 175 pixeles. Por último, se detallan las partes de los vehículos.

3.5 Movimiento de los objetos en pantalla

Una vez teniendo la impresión de los objetos del juego, se puede empezar a estructurar el movimiento de cada uno de ellos, lo cual es la base del juego. En el Código 4 se describe el movimiento de la rana a través de la acción de presionar el botón; para lo que se emplean las señales *ytope* y *xtope*. La función de la primera de ellas es hacer una pequeña pausa en el momento en que se presiona el botón, para que la rana no tenga un movimiento más rápido que la velocidad de refresco de la pantalla. La pausa determinada es de 2.5 ms, lo cual deja que avance un pixel de distancia, dando como resultado que la rana pueda avanzar hasta cuatrocientos pixeles.

Una vez presionado el botón, si ninguna bandera se encuentra en un estado lógico alto, la rana avanza un pixel; luego se activa el conteo a través de la señal, y si la rana alcanzó en ese momento el valor tope de desplazamiento que está dado por 1220, se activa la señal *xtope,* en caso contrario seguirá en estado bajo. Con la bandera activada, se inicia el conteo en ese pequeño periodo no importando si se encuentra presionado o no el botón; mientras tanto, la rana no se desplazará, esperando hasta que el conteo termine, y la bandera vuelva a cero. En caso de que, al momento de ser presionado el botón, se encuentre activa la bandera *xtope* significa que la rana ha llegado una vez al otro lado y ya se encuentra regresando; por lo tanto, en lugar de avanzar en su desplazamiento en el eje horizontal deberá retroceder con las mismas condiciones de avance. Por lo tanto, se activa la señal *y,* y se realiza el conteo de 2.5 ms. En caso de que en el regreso se alcance la posición de salida de la rana, entonces se desactivará la señal *xtope* y permitirá de nueva cuenta el movimiento de izquierda a derecha, o de avance.

Con el movimiento descrito de la rana, se procederá a describir el proceso para permitir el movimiento de los vehículos, los cuales son los obstáculos del juego. Como se puede ver en el Código 5, el movimiento de los vehículos depende de *contador2*, *contador3* y *contador4*. Cuando éstos llegan a un valor definido avanzan en un pixel en su posición vertical. Debido a que los vehículos son los obstáculos dentro del juego, no pueden tener un patrón predefinido; por lo que se buscó la manera de realizar algún tipo de movimiento aleatorio en el movimiento de los mismos. El método que se utilizó para dar el efecto de aleatoriedad es el de dar diferentes valores a los contadores relacionados con los vehículos, haciendo que varíen las velocidades de cada uno.

3.6 Detección de colisión entre la rana y los vehículos

Una vez definidos los movimientos de cada uno de los objetos dentro del juego, lo siguiente por hacer es declarar la acción de colisión en el juego. Para verificar que algún vehículo ha impactado con la rana, se hace mediante tres condiciones, una por cada vehículo. El Código 6 presenta las condiciones para evalúar si alguno de los sesenta pixeles de la rana coincide con los 175 pixeles del ancho del vehículo. Para finalizar, se declaran que los valores de *R*, *G*, y *B* dentro del área de impresión sean cero.

3.7 Creación del sistema integrador

El Código 7 se muestra el sistema integrador, el cual se denominó *VGA*, así mismo es importante no olvidar que esta es la entidad de mayor importancia; por lo tanto, el proyecto debe llamarse de la misma manera. En dicha entidad se declara la arquitectura del sistema, donde se incluyen como entradas *clk2 (*el cual es el reloj de 50 MHz), *P1* y *P2* que son los botones que permiten interactuar con el juego. Por otro lado, las salidas

ISSN en trámite

que se utilizan son las necesarias para poder transmitir imágenes por el puerto VGA, y todas serán de tipo binario. Las primeras son *hs* y *vs*, que son los pulsos de sincronía horizontal y vertical de la pantalla. Posteriormente, se encuentran las salidas de color, cada una con las letras *R*, *G* y *B* utilizando la letra inicial de cada color en inglés, donde *R* es rojo, *G* es verde y *B* es azul.

Posteriormente, se agregan los componentes del *PLL* y sincronía que son los bloques que se interconectan internamente. El bloque *PLL* es aquel que se encarga de convertir el reloj de 50 MHz a 108 MHz, y el bloque sincronía es aquel que sirve para producir las sincronizaciones en el controlador *VGA*.

La última etapa del funcionamiento del sistema es la asignación de las señales a los componentes donde toma los valores del paréntesis que están dados en forma ordenada.

4. RESULTADOS

Al principio del juego se tiene en pantalla los tres carriles y las dos aceras, así como la rana que será el personaje controlado por el usuario mediante dos de los tres pulsadores con que cuenta la placa de desarrollo DE0. Se puede observar en la Figura 2 que los rasgos de los objetos en pantalla son algo bruscos, pero la intención es probar el concepto básico de la jugabilidad y de la impresión en pantalla.



Figura 2. Presentación inicial del videojuego desarrollado.

Luego del arranque del juego, se empiezan a desplegar los vehículos; los cuales servirán de obstáculos para el personaje del jugador. Dichos vehículos son tres, y son de color rojo, azul y naranja. Los carros son representados por un cuadrado del color especificado, además de su parabrisas. En la Figura 3 se pueden observar los tres carros, así como la rana, y que cada uno tiene una velocidad diferente; lo que se entiende puesto que los tres salieron desde la misma línea en la parte inferior de la pantalla, y el vehículo naranja casi ha llegado a la línea superior, mientras el azul es el más retrasado, siendo el más lento.

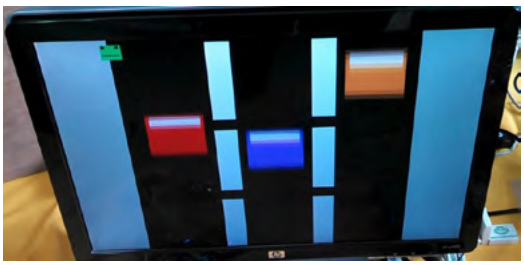


Figura 3. Presentación en pantalla de los vehículos y la rana.

El juego presenta cuatro zonas en donde el jugador puede resguardar a la rana para que no colisione con alguno de los vehículos. Dos de las zonas de seguridad son las aceras, que se encuentran a ambos extremos del arroyo vehicular. Las otras dos zonas seguras son las líneas intermedias de los carriles. Como se puede observar en la Figura 4, las zonas entre los carriles son de dimensiones muy limitadas, y el jugador debe tener la suficiente pericia para poder colocar su rana en alguna de ellas.

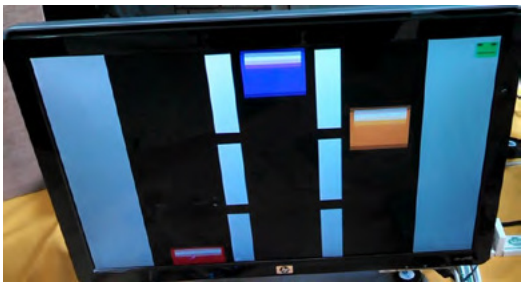


Figura 4. Rana llegando al otro extremo del arroyo vehicular.

Cuando el jugador desplaza a la rana y alguno de los carros colisiona con ella, no importando en que sentido se desplace la rana, ésta volverá al punto de inicio; la cual es la acera izquierda. En la Figura 5 se observa cuando la rana está a punto de colisionar con el carro azul, y si se presta suficiente atención a la misma figura, se observa que la rana está a punto de reaparecer en la esquina superior izquierda debido a la colisión.

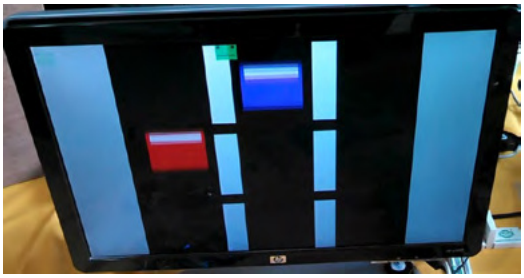


Figura 5. Colisión entre la rana y un vehículo

ISSN en trámite

5. CONCLUSIONES

La intención del presente proyecto fue la creación desde cero de un videojuego, no solo en la parte de la lógica del juego en si mismo, sino desde el controlador de vídeo, y hacerlo en un dispositivo de descripción de hardware. Y si bien existen en la red varios ejemplos de desarrollos para este tipo de videojuego, generalmente emplean un nivel de codificación elevado, y en otros casos hacen uso de elementos que no están disponibles en la mayoría de las tarjetas de desarrollo con FPGA, eso sin contar aquellas implementaciones en dispositivos programables. Sin embargo lo que se buscó desde el principio era involucrar a algunos alumnos de la materia de Diseño Digital con FPGAs en un proyecto que ofreciera un reto, pero que durante el desarrollo del mismo fueran disfrutando de los resultados parciales de su trabajo; siendo su primer hito, el haber conseguido el control de un monitor por el puerto VGA, sin el uso de librerías o módulos establecidos por el fabricante.

El haber manejado de forma satisfactoria el puerto VGA para presentar imágenes, y darles movimiento; abre las puertas a futuros desarrollos, en donde se representen elementos más complejos, o que las transiciones sean más fluidas. Ya que este fue el primer paso hacia controladores de vídeo más sofisticados que permitan una mayor versatilidad en los objetos en pantalla, y que sea totalmente independiente del procesamiento del juego.

En la parte de la jugabilidad, la cual es definida [Sanchez et al, 2008] como el objetivo de los videojuegos de divertir y entretener. El presente desarrollo fue presentado en una feria de carrera, donde varios jóvenes de nivel bachillerato, y algunos más de licenciatura, quedaron satisfechos del juego, haciendo mención que ofrecía un buen grado de reto al usuario, mismo que se va elevando conforme el jugador mejora en el juego.

Finalmente, se puede decir que este fue el desarrollo de un videojuego sencillo, tanto de forma visual como en su interacción con el jugador, y que aún resta mucho camino por recorrer para realizar videojuegos de mayor complejidad, pero al parecer es un buen inicio.

REFERENCIAS

Belli, Simone, and Cristian López Raventós. "*Breve historia de los videojuegos.*" Athenea Digital. Revista de pensamiento e investigación social 14 (2008).

Blasquez, Isabelle, and Hervé Leblanc. *"Experience in learning test-driven development: space invaders project-driven."* Proceedings of the 23rd Annual ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education. 2018.

Cuello, Antònia Bernat. *Los videojuegos, acceso directo a las nuevas tecnologías*. Revista Comunicación y Pedagogía: Nuevas tecnologías y recursos, 2006.

Ferrer Pereira, Álvaro. *"Diseño y fabricación de sistema de videojuegos basado en arquitectura AVR de 8 bits."* (2020).

Lek Boada, Ōscar. *"Making a video game for the Super Nintendo Entertainment System."* (2021).

Moriarty, Tim (May 1984). "Frogger". Ahoy!. pp. 52–53. Retrieved 27 June 2014.

Nieto, Daniel López, et al. *Análisis del contexto histórico y tecnológico del origen de los videojuegos*. Revista ICONO14 Revista científica de Comunicación y Tecnologías emergentes, 2006, vol. 4, no 2, p. 68-86.

Rodríguez, R. F., González, I. M., & Buccini, F. *Procesadores vectoriales comerciales*, documento consultado en línea el 11 de mayo de 2018.

Salazar, Jordi. *Procesadores digitales de señal (DSP)*. Mundo electrónico, 2000, no 314, p. 46-57.

Sánchez, JL González, et al. "De la usabilidad a la jugabilidad: Diseño de videojuegos centrado en el jugador." *Proceedings of INTERACCION* (2008): 99-109.

Sangacha, Inca, and Alexander René. *Desarrollo del entorno 3D del videojuego La Dama, mediante el uso de las técnicas de modelado y texturizado*. BS thesis. Quito: UCE, 2016.

Sevila Segarra, Carlos. *Desarrollo de un videojuego basado en procesamiento de imágenes*. 2016.

Tieri, G., Morone, G., Paolucci, S., & Iosa, M. (2018). *Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies*. Expert review of medical devices, vol. 15, no 2, p. 107-117.

Young, Chris James. *Game changers: Everyday gamemakers and the development of the video game industry*. Diss. University of Toronto (Canada), 2018.

ANEXOS

Código 2. Proceso para generación de las señales de sincronización de VGA.

```
begin
contadores: process(clk2)
 begin
  if rising edge(clk2) then
   if (posicionh < maxx) then
    posicionh <= posicionh+1;
   else
    posicionh <= 0;
    if (posicionv < maxy) then
     posicionv <= posicionv+1;
    else
     posicionv <= 0;
   endif;
  endif;
 endif;
end process;
 sincronización process(clk2)
 begin
  if rising_edge (clk2) then
   if (posicionh > (xp+hfp) and posicionh < (xp+hfp+hsync)) then
    hs <= '1';
   else
    hs <= '0';
    if (posicionv > (yp+vfp) and posicionv < (yp+vfp+vsync)) then
```

ISSN en trámite

```
            vs <= '1';
           else
            vs <= '0';
           end if;
         end if;
       end if;
     end process;
```

Código 3. Condicionales para realizar la impresión de los objetos en pantalla

```
     process (clk2)
     begin
     if (clk2'event and clk2='1') then
       R <= "0000";
       G <= "0000";
       B <= "0000";
       if ((posicionh>(xrana+1) and posicionh<(xrana+60)) and (posicionv>(yrana) and
posicionv<(yrana+60))) then
         R <= "0001";
         G <= "1000";
         B <= "0001";
       end if;
       if ((posicionh>(xrana+4) and posicionh<(xrana+15)) and (posicionv>(yrana+4) and
posicionv<(yrana+15))) then
         R <= "0000";
         G <= "0000";
         B <= "0000";
       end if;
       if ((posicionh>(xrana+43) and posicionh<(xrana+54)) and (posicionv>(yrana+4) and
posicionv<(yrana+15))) then
         R <= "0000";
         G <= "0000";
         B <= "0000";
       end if;
       if ((posicionh>(xrana+4) and posicionh<(xrana+54)) and (posicionv>(yrana+40) and
posicionv<(yrana+44))) then
         R <= "0000";
         G <= "0000";
         B <= "0000";
       end if;
       if ((posicionh>(xcarro-1) and posicionh<(xcarro+175)) and (posicionv>(ycarro-1)
and posicionv<(ycarro+175))) then
         R <= "1111";
         G <= "0000";
         B <= "0000";
       end if;
       if ((posicionh>(xcarro+10) and posicionh<(xcarro+165)) and
(posicionv>(ycarro+10) and posicionv<(ycarro+40))) then
         R <= "1111";
         G <= "1111";
         B <= "1111";
       end if;
       if ((posicionh>(xcarro1-1) and posicionh<(xcarro1+175)) and (posicionv>(ycarro1-
1) and posicionv<(ycarro1+74))) then
         R <= "0100";
         G <= "0000";
         B <= "1101";
       end if;
       if ((posicionh>(xcarro1+10) and posicionh<(xcarro1+165)) and
(posicionv>(ycarro1+10) and posicionv<(ycarro1+40))) then
         R <= "1111";
         G <= "1111";
         B <= "1111";
       end if;
       if ((posicionh>(xcarro2-1) and posicionh<(xcarro2+175)) and (posicionv>(ycarro2-
1) and posicionv<(ycarro2+74))) then
         R <= "1011";
         G <= "0101";
         B <= "0000";
       end if;
       if ((posicionh>(xcarro2+10) and posicionh<(xcarro2+165)) and
(posicionv>(ycarro2+10) and posicionv<(ycarro2+40))) then
         R <= "1111";
         G <= "1111";
         B <= "1111";
       end if;
```

Código 4. Codificación para el movimiento de la rana

```
    if (y = '0' and x = '0' and xtope = '0') then
      xrana <= xrana+1;
      y <= '1';
      if rana xrana > 1220 then
        xtope <= '1';
      end if;
      elsif ((y = '0' and x = '0' and xtope = '1')) then
        xrana <= xrana-1;
        y <= '1';
        if xrana < 20 then
          xtope <= '0';
        end if;
      end if;
      if (y = '1') then
        contador <= contador+1;
        if (contador = 266000) then
          contador <= 0;
          y <= '0';
        end if;
      end if;
    end if;
```

Código 5. Codificación para el movimiento de la rana

```
    contador2 <= contador2+1;
    if (contador2=130000) then
      ycarro <= ycarro-1;
      contador2 <= 0;
    end if;
    contador3 <= contador3+1;
    if (contador3=110000) then
      ycarro1 <= ycarro1-1;
      contador3 <= 0;
    end if;
    contador4 <= contador4+1;
    if (contador4=90000) then
      ycarro2 <= ycarro2-1;
      contador4 <= 0;
    end if;
```

Código 6. Detección de colisión entre los vehículos y la rana

```
    if ((xcarro < xrana+59) and (xrana < xcarro+175)) then
      if (ycarro < yrana+59) then
        xrana <= 1;
        yrana <= 20;
      end if;
    end if;
    if ((xcarro1 < xrana+59) and (xrana < xcarro1+175)) then
      if (ycarro1 < yrana+59) then
        xrana <= 1;
        yrana <= 20;
      end if;
    end if;
    if ((xcarro2 < xrana+59) and (xrana < xcarro2+175)) then
      if (ycarro2 < yrana+59) then
        xrana <= 1;
        yrana <= 20;
      end if;
    end if;
    if ((posicionh > 1280 and posicionh < maxx) or (posicionv > 1024 and posición <
maxy)) then
      R <= "0000";
      G <= "0000";
      B <= "0000";
    end if;
```

Código 7. Detección de colisión entre los vehículos y la rana

```
    entity vga is
      port (
      clk2, P1, P2: in std_logic;
      hs, vs, R, G, B: out std_logic );
    end entity vga;
    architecture comportamiento of vga is
```

ISSN en trámite

```
  signal VGA_CLK, RESET: std_logic:= '0';
  component PLL is
  port (
    clkin_clk: in std_logic:='X';
    resetin_reset: in std_logic:='X';
    clockout_clk: out std_logic);
  end component PLL;
component sincronía is
  port (
    clk2, swi, swd: in std_logic;
    hs, vs: out std_logic;
    R, G, B: out std_logic );
  end component sincronia;
  begin
    c1: sincronía port map (VGA_CLK, P1, P2, hs, vs, R, G, B);
    c2: PLL port map (clk2, RESET, VGA_CLK);
end architecture;
```

ISSN en trámite

Low-cost contact-less data input device for virtual reality applications using haptic fuzzy logic

Edgar Serrano Pérez*, Anabelem Soberanes Martín, Cristina Juárez Landín*****

*Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Valle de Chalco. (Tel: 55 5971 4940; e-mail: eserranop_s@uaemex.mx).
**Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Valle de Chalco. (Tel: 55 5971 4940; e-mail: asoberanesm@uaemex.mx).
***Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Valle de Chalco. (Tel: 55 5971 4940; e-mail: cjuarezl@uaemex.mx).

Abstract: Virtual reality can be used in educational environments to enhance learning experiences through audiovisual information presentation. To collect users' data information, an input electronic device has been developed using low-cost hardware elements for virtual reality applications. The system consisted of a light-dependent resistor module embedded into a PVC structure; the arrangement was used to obtain different input levels a function of obscuring light with a hand movement. A fuzzy logic controller has been developed using an ESP8266 microcontroller board to provide haptic vibration feedback using a small DC motor attached to an elastic bracelet. The fuzzy logic sensor input information was sent through a constant data flow to a virtual reality application for visual 3D representation during operation to enhance the user's precision control. The system's performance has been tested for 15 high school students ranging from 16 to 19 years old.

Keywords: Human-computer interaction, Fuzzy and neural systems relevant to control and identification, Cyber-Physical Systems, Smart Sensors and Actuators, Control education using laboratory equipment, Low cost technologies.

1. INTRODUCTION

Virtual reality, a technology for creating digital scenarios enables multiple sensory system interaction through human-computer interfaces. A virtual reality application processes data input information to execute an instruction set to obtain an desired output; usually output information is deployed through multiple multimedia devices (WANG et al., 2019). The application's user has continuous monitoring information using one or more human sensory systems, the human reaction is feedback through the motor system (Cha et al., 2017). The continuous process for sending and receiving information between a human and a computer system, has been used to improve the human being's ability to acquire new knowledge and skills, such as educational and training processes (Ahir et al., 2020; Radianti et al., 2020; Xie et al., 2021). Commonly, virtual reality development applications is carried out using human sight and/or hearing senses, which are considered fundamental elements of human recognition on the application's outputs. As soon as the user decides a response to the sensorial stimulus, it is necessary to take an action and send some information to the application. Using fingers and hands moves in response to audiovisual stimulation, some input data devices have been developed (Bharath & Patil, 2018; Mengting XIAO, 2020). However, recently the mixed-use of more sensory senses and multiple motor systems allows generating immersive experiences to improve the user experience (Edwards et al., 2019; Kim et al., 2017). Considering the microcontroller boards market growth, which is reflected in an increased processing capacity and reduced costs also, has allowed creating interesting haptic prototypes for adding immersive experiences while using virtual reality applications (V. Hayward & K. E. Maclean, 2007; Zenner & Krüger, 2019). In this sense, most technological developments have been used as input data devices for a virtual reality application, considering human physical contact with an object surface. The COVID-19 emergency has increased and accelerated the needing to develop data input capture information devices, in order to enable a continuous data information loop, but with non-contacting surface technology (Rizzo et al., 2021; Valentina Bartalesi, 2021). Taking these considerations into account, a data input information touch-less device has been developed.

2. MATERIALS AND METHODS

A touch-less input device was developed to define a fuzzy vibration control system set point. Through an LDR (light-dependent resistor) module embedded into a PVC "T", a small structure with openings was obtained. The hand location and position around the PVC structure periphery generate a shadow that limits the sunlight flow into the arrangement. The LDR

ISSN en trámite

module generates an analog electrical output signal according to the amount of sun-light detection. An ESP8266 microcontroller board was used as data processing unit, it has an A0 input pin through which the signal from the LDR module is read. The analog-digital converter resolution is 10 bits, so a number between 0 and 1024 is obtained. The power supply source needed for the LDR module was provided by the same microcontroller board. The output signal was defined as PWM (pulse width modulation) type through the GPIO2, which allows controlling the vibration intensity using a small DC vibrating motor. To drive the DC vibrator motor, an electronic circuit based on the 2N2222 transistor was used, a parallel connection with a rectifier diode as a protection element is shown in Fig. 1.

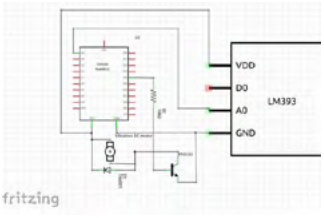


Fig. 1. Electronic connection diagram

The motor's small dimensions and the low power consumption allowed to use of the same voltage source provided by the microcontroller board. The acquisition cost to obtain the materials does not exceed $15.00 Dollars. The most expensive item to develop the hardware system is the ESP8266 microcontroller board; the approximate cost is around $7 USD. The fuzzy vibration control system algorithm was implemented using the eFLL library within the Arduino IDE development environment**.** The Arduino-based program was developed to the ESP8266 microcontroller board in order to use the analog input A0 pin; in this case, to obtain an analog LDR signal as a reference input for a fuzzy logic vibrating control system. A "shadow" variable obtained from the non-contact LDR module was represented through 5 fuzzy membership functions. The universe of discourse for the variable "shadow" was from 0 to 1024, as they correspond to all the possible values obtained from the LDR module, as shown in Fig. 2.

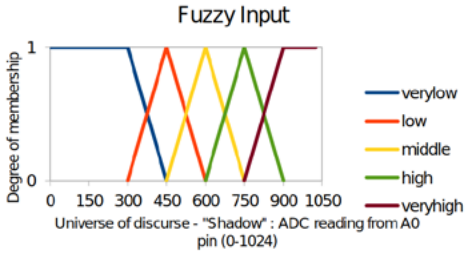


Fig. 2. Input membership functions for the linguistic variable "shadow"

The fuzzy control system output was represented by the PWM output variable signal. The resolution of the PWM signal is also 10 bits, so the universe of discourse is also from 0 to 1024. In this sense, 5 membership functions were used to represent the output variable, as shown in Fig. 3.

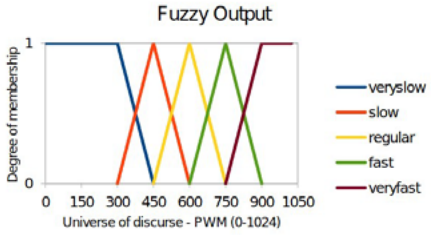


Fig. 3. Output membership functions for the PWM variable

The set of fuzzy rules to create the system's knowledge base is shown in Table 1.

Table 1. Fuzzy rule-base description

Rule	Antecedent	Consequent
R_1	**IF** Shadow **is** verylow	**THEN** PWM **is** veryslow
R_2	**IF** Shadow **is** low	**THEN** PWM **is** slow
R_3	**IF** Shadow **is** middle	**THEN** PWM **is** regular
R_4	**IF** Shadow **is** high	**THEN** PWM **is** fast
R_5	**IF** Shadow **is** veryhigh	**THEN** PWM **is** veryfast

The fuzzy vibration control system uses the Mamdani-type fuzzy inference method. By other hand, the defuzzification process is carried out through the center of the area method.
The system's response can be simulated through the open-source Scilab software and the Fuzzy Logic Toolbox. The program allows to create a Mamdani-type fuzzy system, with the same input-output membership function, as well as the rule base used. Through the use of the "evalfls" function, an output can be obtained when an input is evaluated. The process allows to build the surface that maps the "shadow" input and the "PWM" output. The process was carried out from 50 to 1000 input values, obtaining the surface shown in Fig. 4.

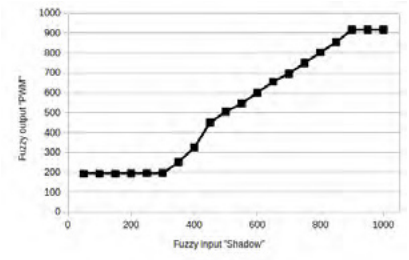


Fig. 4. Surface obtained from inputs evaluation.

ISSN en trámite

At the end of each execution cycle for the microcontroller board, data output packets separated by a comma are sent using serial communication. Each data packet consists of 5 numerical values per row, corresponding to the membership degree for each function that represent the “shadow” input variable. The virtual reality application was developed using the Unity free edition. The application has been programmed to enable serial communication to receive the data sent by the ESP8266 microcontroller board through the USB port. The program receives a constant input data stream which is split tacking as reference each comma signal. In this way, the data was divided and stored in variables to allow modifying dimensions only in the “y” axe. The process is done for each cube, as shown in a) and b) from Fig. 5. The virtual display allows visual monitoring for the fuzzy membership degrees for each term of the “shadow” input variable.

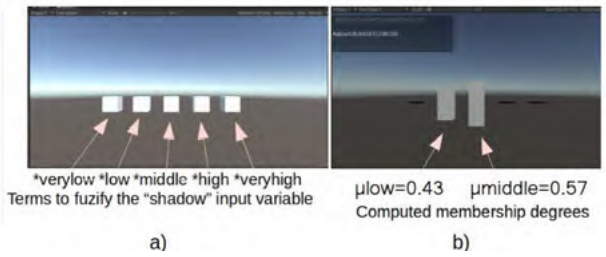


Fig. 5. a) Input membership functions for the “shadow” variable through 3D cubes before starting the application. b) Visual real-time fuzzification process to represent each input membership function degree according to its height dimension

The membership degrees obtained are found in the 0 to 1 range as shown in b) of Fig. 5. As soon as membership degree increases for a variable “shadow” term, the 3D cube starts to be elongated in the “y” direction axis. This behaviour about cube dimensions is inverse as soon as the function membership degree decreases. In this way, the user can visually co-relate the shadow amount obtained by hand movement and position it around the sensor device without contact. This behaviour correspond to a visual feedback obtained in space and time according to the hand shadow. This situation allows controlling the sunlight amount of light at the sensor surface in a certain period under different conditions. The sensor information is translated by the virtual application, used for displaying data input information selection. The main goal for the application is to provide enough user visual information to increase the user’s precision to control the vibration device without looking directly at the input hardware device. This task could be so complex for the human eye, as it is possible reaching the same specific input with multiple different positions and locations of the user's arm-hand assembly.

3. RESULTS AND DISCUSSION

To obtain a system's general opinion and its connection with the virtual reality application, 15 students were allowed to test the system. The group study age range was from 16 to 19 years old, with a 17.3 year old average. Before starting each test, the participant was given a disinfectant solution to sanitize the hands and wrist where the elastic bracelet was located. The flexible arrangement embedded a PCB board where the vibration motor was placed. Face masks were used during all time, preserving 2 meters social distance. After sanitizing process was concluded, the student was given a brief system description, which allowed to explore its operation, first without using the virtual reality application as shown in Fig. 6.

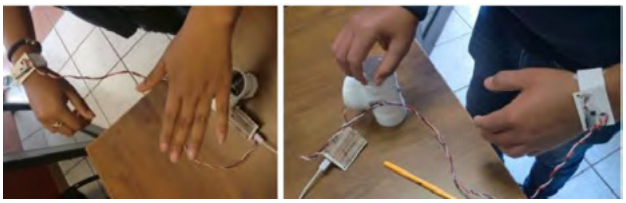


Fig. 6. Users testing the electronic device through different hand movements and positions

The main student’s goal was trying to identify the different vibration intensity levels using the non-contact input system. The instruction was to reach the maximum, minimum, and intermediate vibration levels. Once the participant showed some certain proficiency over the device, the virtual reality application was started, and the student was allowed to graphically visualize the whole set of membership degrees for each input. During the use of the virtual reality application, the participant was suggested to achieve and maintain for 3 seconds the maximum membership of cubes 2 and 3, according to the “low” and “middle” inputs. The process was fast in general; it was noted that some students mastered it only a few seconds after started the visual looking in the virtual application display. As a matter of fact, some students mentioned that it was a helpful visual tool to better controlling the vibration device. To collect formal opinions and impressions, a questionnaire with 10 Likert-type multiple-choice questions was answered after each experience using sheets of paper. The qualitative questionnaire was applied to identify the main areas which are needed to be improved; in this sense, to improve the technical performance related with usability tasks such as effectiveness and satisfaction (Brooke, 1996). The complete questionnaire is shown in Table 2.

Table 2. Likert-type questionnaire

1. The use of the device seemed to me intuitive.
2. I can achieve the desired response with a minimum physical

ISSN en trámite

effort.
3. I can identify most electronic devices and construction materials used.
4. It is possible to adapt the control system to another application of my daily life.
5. The virtual reality application allowed to me a better identification of the different levels of control that I can select.
6. I consider that using control devices without physical contact provides a more realistic experience of immersion when is used with a virtual reality application.
7. The minimum and maximum magnitudes of vibration of the device seemed safe to me.
8. The system responds proportionally according to the user's actions.
9. It is perceived that device's responses is in real time.
10. I feel safe when using a device that does not require physical contact of surfaces for its control/manipulation.

Each question had an optional comment section to write a relevant note, results obtained were presented into a box and whiskers plot using the R programming language, as shown in Fig. 6.

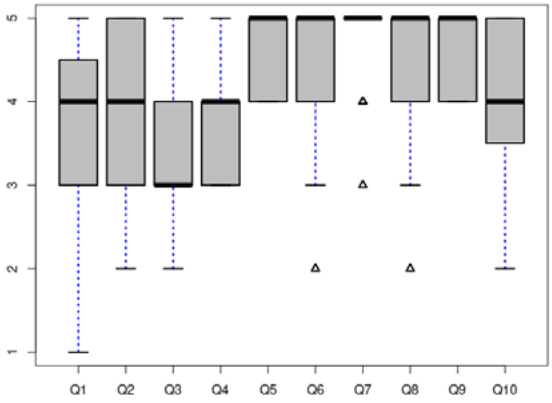


Fig. 6. Box and whiskers plot were obtained from 15 students ranging from 16 to 19 years old through 10 Likert-type questionnaire, from 1-very disagree to agree 5-very

Question 1 was related to the first impression which users had when started using the device. The main goal was to identify if the user considers the system intuitive, that is recognizing some hand movements to control it and obtaining a desired output response. The average for the first question answers was 3.73, so the users agreed that the system is in general intuitive. These results allowed us to visualize their opinion about the system as a self-understanding device. Question 2 allowed to identify if the user considers that is possible to control the device through a minimal physical effort. Interestingly, it was found that although it is always necessary to perform movements or maintain a fixed position with the hand-arm set, it does not represent a great load of physical effort for the human body. The high school group showed a 3.86 average score. Question 3 was related to understanding if the user's knowledge allows identifying the different building elements which the system was manufactured. The answers obtained a 3.26 average, according to the range between neutral and agree opinions. This behaviour can be understood because some users identified main common elements such as the PVC structure, where the light sensor was located. In the same way, the elastic bracelet structure with the vibrating motor embedded on it, usually found into cell phones as an alert tool. In contrast, the microcontroller board and some electronic components were not easily identified for everyone, since in general they have not had any prior approach during their training. One student mentioned having taken an after-school robotics course, where he learned microcontroller programming with Arduino-based boards and identified most of the electronic components used. In this question were obtained the lower scores of the whole questionnaire.

Question 4 received a 3.66 average score, slightly below the "agree" threshold. The main question goal was intended to explore if users were able to visualize a possible system application in their daily life activities. The device was conceived as a touch-less input data device for virtual reality applications. Interestingly, in the questionnaire optional comments section, 2 people agreed to write that the system can be adapted and used to help people with some disability or visual impairment. Question 5 received an average of 4.53. Through this question it was possible to know the influence of the visual graphic information to achieve better precision handling, to reach and maintain a certain system output. At the beginning of each test, each participant was given a brief description of the device's operation, to start testing its operation. In some cases, something fascinating happened; after a few seconds, some users began to close their eyes and try to identify the operation of the system only by perceiving the level of vibration in response to the hand movements. This behaviour could indicate that the user's human-eye visual information does not allow to the user achieve precise control of the system, as through human eyes can't get enough information. In this way, the user decided to concentrate and focus its attention solely on the vibration perception provided by the motor at the wrist. Although the user can observe and estimate the hand distance and position around the sensor device, indeed it is a highly complex process. The human hand consists of many small bones interconnected by flexible ligatures, which in fact are also covered with soft and deformable tissue such as the

ISSN en trámite

skin; embedded into fluids such as the blood. These structural characteristics allow the hand to have numerous degrees of freedom (Soechting & Flanders, 1997), that when combined with the working space of the human arm, allows achieving a certain objective through a large set of multiple positions. After using and recognizing the system for a few minutes, the users were allowed to use the virtual reality application at the same time when the system was operated. The use of the virtual reality application allowed users to view only the input data information provided by the sensor. When users started to use the device and obtain visual information feedback from the system data entry, it was possible to perceive that some users focused their attention on the computer screen; some opened their eyes a little wider or tried to get closer to the screen. Some users changed their facial expressions to develop a surprising face and some more generated smile and happiness expressions. These sudden changes between the different favourable facial expressions can be understood by the visual information feedback that human beings frequently required to achieve better process control. In this sense, this experience can be related to the fact the users finally joined the puzzle pieces for the learning process, as now they are able to use the system through efficient manipulation. Frequently these scenarios kinds generate satisfaction feelings for example when learning to ride a bike using different human sensorial systems.

Question 6 received a favourable general opinion with an average of 4.26. Through this question was explored the user opinion about using the input system without any surface contact, it was possible to develop an immersive experience into the virtual reality application. In Question 7, the perception of physical security when using the device both to its maximum and minimum capacity was explored, the goal was to understand if the user feels safe while using it attached to the human body. The average score was 4.73, that is, slightly below the maximum selection "very agree". Their opinion reflects that almost any potential physical damage can be generated while using the system for this age group rage.

Question 8 allowed to identify the user's opinion when the hand movements are used as data input to obtain a certain output. The question was focused to understand if the user considers that the output is proportional to the user's input. A 4.4 average score was obtained, an intermediate rating between "agree" and "very agree". During the recognition process, the user performs various movements with the hand to verify the influence of sunlight when it is allowed or restricted to reach the sensor surface device. Most users related output with the current height from PVC structure to the back of their hands as a range delimiter. In this way, they perceived a proportional response as the increasing distance between the sensor and the hand reduced vibration. By another hand, reducing the distance from the sensor to the hand created a higher shadow effect to increase vibrations. The algorithm that allowed control of the motor vibrations in the bracelet was implemented using a fuzzy logic-based proportional controller with the eFLL library loaded into an ESP8266 board programmed through the Arduino language.

Question 9 provided an opinion perspective to know if the user perceives a fast response over time, to test different input movements and their respective outputs responses. The second better average perception was obtained with an average score of 4.66. This value tilts the balance towards the answer "very agree", so users, in general, feel that the system has a real-time speed response. The good reaction speed could have promoted that during the optional comments writings, it was considered 4 times to apply the system in video games and home-entertainment activities. The last question 10, was focused to know if using this device as data input without touching any kind of surface can provide a safer perception to the user. The goal was to identify a possible alternative to prevent infectious diseases or injuries while keeping the track of the user's hand movements. An 3.93 average was obtained slightly below the "agree" response. The touch-less system characteristic seems to be so relevant to this age group to get a safer hygienic operation; although is possible to sanitize surfaces using gels and solutions, a safer perception can be obtained avoiding any surface contact.

4. CONCLUSIONS

A touch-less data input device for virtual applications has been developed using low-cost accessible hardware elements. The system output corresponds to a vibration level obtained from a DC motor embedded into an elastic bracelet. To control the different vibrations levels, a fuzzy logic proportional controller was implemented on an ESP8266 microcontroller board. The fuzzy logic algorithm provided a stable, fast and linear response to input changes as haptic feedback for the touchless input device. An experience without response delays have shown to improve the noise stimulation in a serious learning game, using fuzzy logic to control the aroma fan sweep and their corresponding user olfaction (Garcia-Ruiz et al., 2021). The whole set of electronic devices to build the system is around $15, so it can be adapted in most public universities as a learning tool to stimulate skin receptors and muscular systems during educational activities.

The sensor based structure allows preventing to touch surfaces while sending data input information for a virtual reality application. Under these considerations, the user can interact with virtual reality applications while receiving haptic feedback for effectively controlling a touch-less input signal. To assess the system performance, a set of 10 Likert-type questions were answered by 15 students ranging from 16 to 19 years old. The high scores obtained in questions 5, 7 and 9, revealed a trend towards the maximum score that the system can obtain, that is through the "very agree" criteria selection. From the analysis of the results, it was observed that virtual reality applications allowed users to improve control for the vibration device by

ISSN en trámite

displaying interactive information for the input variable. The system was considered safe to operate within the entire operating range without representing any risk or damage to users. The output response of the system was perceived as fast, and its output operations were executed in real-time speed.

Overall, the main strengths of the system found is that there is a general perception that the system is fast, safe, and accurate in its different sets of operations that it can perform. From the comments received by the users who participated in the test, the following thoughts are relevant: it was suggested the system's potential of being applied as an auxiliary device to detect and warn of dangerous situations for blind people. In this sense, its application for the impact and obstacles detection was mentioned, as well as its use in depth measurement, a situation that would potentially allow the detection of steps for blind people. Moreover, the mention of words such as entertainment and video games 4 times, indicated that this device has the strong potential to be adapted as an input device in virtual reality applications implemented to develop formal educational video games.

ACKNOWLEDGMENTS

First author was supported by CONACYT "Estancia Posdoctoral Académica" 2021.

REFERENCES

Ahir, K., Govani, K., Gajera, R., & Shah, M. (2020). Application on Virtual Reality for Enhanced Education Learning, Military Training and Sports. *Augmented Human Research*, *5*(1), 1–9. https://doi.org/10.1007/s41133-019-0025-2

Bharath, V. G., & Patil, R. (2018). Solid Modelling Interaction with Sensors for Virtual Reality Welding. *MATEC Web Conf.*, *144*. https://doi.org/10.1051/matecconf/201714401008

Brooke, John, 1996. SUS: A "Quick and Dirty" Usability Scale, in: Usability Evaluation In Industry. CRC Press.

Cha, Y., Seo, J., Kim, J.-S., & Park, J.-M. (2017). Human–computer interface glove using flexible piezoelectric sensors. *Smart Materials and Structures*, *26*(5), 057002. https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa6b64

Edwards, B. I., Bielawski, K. S., Prada, R., & Cheok, A. D. (2019). Haptic virtual reality and immersive learning for enhanced organic chemistry instruction. *Virtual Reality*, *23*(4), 363–373. https://doi.org/10.1007/s10055-018-0345-4

Garcia-Ruiz, M., Kapralos, B., & Rebolledo-Mendez, G. (2021). Towards Effective Odor Diffusion with Fuzzy Logic in an Olfactory Interface for a Serious Game. *HCI International 2021 - Late Breaking Papers: Multimodality, EXtended Reality, and Artificial Intelligence: 23rd HCI International Conference, HCII 2021, Virtual Event, July 24–29, 2021, Proceedings*, 3–16. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90963-5_1

Kim, M., Jeon, C., & Kim, J. (2017). A Study on Immersion and Presence of a Portable Hand Haptic System for Immersive Virtual Reality. *Sensors*, *17*(5). https://doi.org/10.3390/s17051141

Mengting XIAO, Z. F. (2020). Multimodal interaction design and application in augmented reality for chemical experiment. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, *4*, 291.

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, *147*, 103778. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778

Rizzo, J.-R., Beheshti, M., Fang, Y., Flanagan, S., & Giudice, N. A. (2021). COVID-19 and Visual Disability: Can't Look and Now Don't Touch. *PM & R : The Journal of Injury, Function, and Rehabilitation*, *13*(4), 415–421. https://doi.org/10.1002/pmrj.12541

Soechting, J. F., & Flanders, M. (1997). Flexibility and Repeatability of Finger Movements During Typing: Analysis of Multiple Degrees of Freedom. *Journal of Computational Neuroscience*, *4*(1), 29–46. https://doi.org/10.1023/A:1008812426305

V. Hayward & K. E. Maclean. (2007). Do it yourself haptics: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *14*(4), 88–104. https://doi.org/10.1109/M-RA.2007.907921

Valentina Bartalesi. (2021). Rethinking contact: The haptic in the viral era. *Aisthesis. Pratiche, Linguaggi e Saperi Dell'estetico*, *14*(1). https://doi.org/10.36253/Aisthesis-12481

WANG, D., GUO, Y., LIU, S., ZHANG, Y., XU, W., & XIAO, J. (2019). Haptic display for virtual reality: Progress and challenges. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, *1*(2), 136–162. https://doi.org/10.3724/SP.J.2096-5796.2019.0008

Xie, B., Liu, H., Alghofaili, R., Zhang, Y., Jiang, Y., Lobo, F. D., Li, C., Li, W., Huang, H., Akdere, M., Mousas, C., & Yu, L.-F. (2021). A Review on Virtual Reality Skill Training Applications. *Frontiers in Virtual Reality*, *2*. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/frvir.2021.645153

Zenner, A., & Krüger, A. (2019). Drag:On: A Virtual Reality Controller Providing Haptic Feedback Based on Drag and Weight Shift. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12. https://doi.org/10.1145/3290605.3300441

ISSN en trámite

Aproximación analítica para el cálculo del voltaje en el punto máximo de potencia de módulo fotovoltaico

José Gudalupe Tirado Serrato * **Serguei Maximov** **

* *PGIIE, Instituto Tecnológico de Morelia, (e-mail: jotiradoserrato@gmail.com).*
** *PGIIE, Instituto Tecnológico de Morelia, (e-mail: sgmaximov@yahoo.com.mx).*

ResumenEn el presente trabajo se aborda el problema de encontrar una aproximación analítica para calcular el voltaje en el punto máximo de potencia considerando las resistencias en serie y en paralelo, en términos de la función W de Lambert. Partiendo del hecho de que los valores que involucran el argumento de la función $W(x)$ de Lambert son pequeños, es decir $x \ll 1$, se usó una aproximación asintótica en $x \to 0$, que permitió encontrar una solución explicita, la cual depende de los parámetros característicos del módulo fotovoltaico. Un caso de estudio es presentando, donde se encontró que la aproximación tiene un error relativo porcentual menor al 1.5 %.

Keywords: Módulo fotovoltaico, solución analítica, punto máximo de potencia, Función W de Lambert.

1. INTRODUCCIÓN

El circuito eléctrico equivalente más común para representar un módulo fotovoltaico es el de diodo único que depende de 5 parámetros (Nassar-Eddine et al. (2016)), los cuales son: la resistencia en serie (R_s), la resistencia en paralelo (R_p), la corriente de saturación del diodo (I_0), la fotocorriente (I_L) y el termovoltaje (V_t). Sin embargo la naturaleza no lineal del modelo matemático subyacente dificulta obtener soluciones analíticas explicitas para calcular sus parámetros característicos. Éste problema fue resuelto inicialmente por (Banwell and Jayakumar (2000); Ortiz-Conde et al. (2000); Jain and Kapoor (2004)) usando la función W de Lambert, ampliamente estudiada por (Corless et al. (1996); Olver et al. (2010)), la cual permite encontrar una solución explicita del voltaje con respecto a la corriente y viceversa. A partir de estos trabajos pioneros se encontraron soluciones analíticas para calcular los diferentes parámetros de los módulos fotovoltaicos. Jain and Kapoor (2005, 2004) encontraron expresiones para calcular el factor de idealidad del módulo fotovoltaico, la corriente de corto circuito, el voltaje de circuito abierto, así como expresión para calcular el valor dinámico de la resistencia en serie y en derivación. Femia et al. (2012) encontraron una fórmula para calcular la resistencia en paralelo. Garcia and Strandberg (2021) establecieron una fórmula para calcular la resistencia en serie.

Para medir el desempeño de un módulo fotovoltaico es necesario calcular el valor del voltaje y la corriente en el punto máximo de potencia, lo cual suele no ser una tarea sencilla, ya que las ecuaciones involucradas son altamente no lineales (Saloux et al. (2011)). Por su parte Cubas et al. (2017); Laudani et al. (2017) calcularon el voltaje en el punto máximo de potencia (MPP por sus siglas en inglés) por medio de la solución de ecuaciones implícitas usando el modelo de 5 parámetros de diodo único. Sin embargo estas ecuaciones debe de solucionarse numéricamente, lo cual trae problemas de convergencia y alto costo computacional. Por otro lado Farivar et al. (2010) presentó una fórmula analítica para calcular el voltaje en el MPP, sin embargo ésta no considera la resistencia en serie ni en paralelo, lo cual evita contemplar la perdidas de potencia inherentes al módulo. Recientemente Garcia and Strandberg (2021) encontraron una expresión analítica para calcular el voltaje en el MPP tomando en cuenta la resistencia del módulo.

Debido a la falta de una expresión analítica para calcular el voltaje en el MPP que considere la resistencia en serie y paralelo, en el presente trabajo se desarrolló una fórmula a partir de una aproximación asintótica que permite aproximar la función $W(x)$ por medio de su argumento x, considerando que $x \ll 1$. Además es presentado un caso de estudio donde se contempla un módulo con tecnología multicristalina.

La organización del documento es la siguiente: En la sección 2 se introduce el modelo estándar de diodo único

⋆ Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

ISSN en trámite

de cinco parámetros. La sección 3 muestra el desarrollo de la formula analítica para calcular el voltaje en el punto máximo de potencia. La sección 4 presenta los resultados obtenidos utilizando un caso de estudio. Finalmente en la sección 5 se da la conclusión.

2. MODELO MATEMÁTICO DE MÓDULO FOTOVOLTAICO

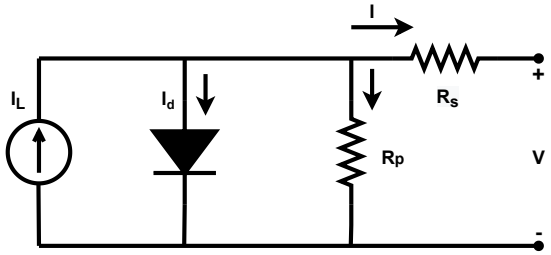


Figura 1. Circuito eléctrico equivalente de un módulo fotovoltaico.

El modelo matemático del circuito eléctrico equivalente de un módulo fotovoltaico mostrado en la figura 1 está dado por la siguiente expresión Femia et al. (2012):

$$I = I_L - I_0\left(e^{\frac{V+IR_S}{AV_tN_S}} - 1\right) - \left(\frac{V+IR_s}{R_p}\right), \quad (1)$$

donde:

$$V_t = \frac{kT}{q}, \quad (2)$$

es llamado voltaje termal, R_s es la resistencias en serie, R_p la resistencia en paralelo, A el factor de idealidad del diodo, I_0 la corriente de saturación del diodo, I_L la fotocorriente, T la temperatura de la celda, k es la constante de Boltzmann $1{,}381\times10^{-23}$ (J/K), q es la carga del electrón $1{,}602\times10^{-19}$ (C) y N_S es el número de celdas conectadas en serie. Este es conocido como modelo de cinco parámetros con un diodo ya que depende sólo de: I_L, I_0, A, R_s y R_p. Una manera de calcular estos parámetros desconocidos es usando los datos de placa proporcionados por el fabricante, que proveen la siguiente información:

- Voltaje de circuito abierto V_{oc}
- Corriente de corto circuito I_{sc}
- Coeficiente de Voltaje/Temperatura de circuito abierto α_v
- Coeficiente de Corriente/Temperatura de corto circuito α_i
- Voltaje y corriente en el punto máximo de potencia: I_{mpp} y V_{mpp}.

Estos datos son obtenidos en pruebas bajo condiciones estándar (T_n=25°C, G_n =1000 W/m^2). La fotocorriente y la corriente de saturación en condiciones estándar está dada por Femia et al. (2012):

$$I_{Ln} = I_{sc}\frac{R_s+R_p}{R_p}, \quad (3)$$

$$I_{0n} = \frac{I_{Ln}}{e^{\frac{V_{oc}}{AV_{tn}N_s}}+1}, \quad (4)$$

donde: $V_{tn} = \frac{kT_n}{q}$. Una practica regular en la literatura según Nassar-Eddine et al. (2016) es considerar R_p, R_s y A como constantes e I_0 como I_L dependientes de la temperatura e irradiancia. En Femia et al. (2012) sugieren una dependencia lineal de la fotocorriente con respecto a la temperatura e irradiancia como sigue:

$$I_L = \frac{G}{G_n} * \left(I_{Ln} + \alpha_i(T - T_n)\right). \quad (5)$$

La corriente de saturación por otro lado está dada por Femia et al. (2012):

$$I_0 = CT^3e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (6)$$

donde: E_g es la la banda de energía prohibida que para el silicio cristalino es igual 1.800846×10^{-19} Joules y C es el coeficiente de temperatura dado por:

$$C = \frac{I_{0n}}{T_n^3e^{-\frac{E_g}{kT_n}}}. \quad (7)$$

Con las ecuaciones presentadas es posible calcular los parámetros del módulo fotovoltaico partiendo de las especificaciones dadas por el fabricante. En seguida se muestra el desarrollo de una aproximación analítica para el cálculo del voltaje en el MPP.

3. CÁLCULO ANALÍTICO DEL VOLTAJE EN EL PUNTO MÁXIMO DE POTENCIA

Denotando: $\nu \equiv 1+R_s/R_p$, $\beta \equiv I_L+I_0-\frac{V}{R_p}$, $\lambda \equiv \frac{R_s}{A*V_t*N_s}$ y $\alpha \equiv -I_0e^{\frac{V}{AV_tN_s}}$, (1) se puede representar como:

$$I\nu = \beta + \alpha e^{\lambda I}, \quad (8)$$

con algunas manipulaciones algebraicas (8) se puede expresar como:

$$e^{\frac{\beta\lambda}{\nu}-\lambda I}\left(\frac{\beta\lambda}{\nu} - \lambda I\right) = -\frac{\alpha\lambda}{\nu}e^{\frac{\beta\lambda}{\nu}}. \quad (9)$$

La solución de la ecuación anterior está dada por:

$$I = \frac{\beta}{\nu} - \frac{W\left(-\frac{\alpha\lambda}{\nu}e^{\frac{\beta\lambda}{\nu}}\right)}{\lambda}, \quad (10)$$

donde: $W(x)$ es la función W de Lambert, la cual tiene una aproximación asintótica en $x \to 0$ dada por (Olver et al. (2010); Corless et al. (1996)):

$$W(x) \sim x. \quad (11)$$

El argumento de la función W en (10) suele ser mucho menor que $|1|$, lo que permite usar (11) como una aproximación. Volviendo a las variables originales y en virtud de (11), la corriente dada por (10) se puede representar como:

$$I \sim \frac{I_L+I_0}{\nu} - \frac{V}{R_p\nu} - \frac{I_0}{\nu}e^{(I_L+I_0)\frac{\lambda}{\nu}}e^{V\lambda(\frac{1}{R_s}-\frac{1}{R_p\nu})}, \quad (12)$$

ISSN en trámite

denotando ahora las variables: $\xi \equiv \frac{I_L+I_0}{\nu}$, $\theta \equiv -\frac{I_0}{\nu}e^{(I_L+I_0)\frac{\lambda}{\nu}}$, $R = \lambda\left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_p\nu}\right)$ y $\chi \equiv -\frac{1}{R_p\nu}$, la ecuación (12) esta dada por:

$$I \sim \xi + \chi V + \theta e^{VR}.$$

Usando la expresión anterior la potencia se puede aproximar como:

$$P \sim \xi V + \chi V^2 + \theta e^{VR} V, \tag{13}$$

igualando a cero la deriva respecto a V con la finalidad de encontrar el valor del voltaje donde se tiene una potencia máxima:

$$\xi + 2\chi V + \theta e^{VR}(RV + 1) = 0, \tag{14}$$

despreciando el término $2\chi V$ en la expresión anterior, ya que $|\chi| \ll 1$ y haciendo algunas manipulaciones algebraicas (14) se puede aproximar mediante la siguiente expresión:

$$e^{VR+1}(RV + 1) = -\frac{\xi e}{\theta},$$

cuya solución está dada por:

$$V \sim \frac{W\left(-\frac{\xi e}{\theta}\right) - 1}{R}. \tag{15}$$

La expresión anterior es una aproximación al valor de voltaje que maximiza la potencia, en términos de los parámetros intrínsecos del módulo fotovoltaico. En seguida se presentará un caso de estudio donde se evalúa la efectividad de esta formula.

4. RESULTADOS

En las tablas 1 y 2 se muestran los datos de placa y los parámetros característicos de un módulo multicristalino (Kyocera KC2000GT), inicialmente analizado en Nassar-Eddine et al. (2016) y utilizado en el presente trabajo como caso de estudio.

Tabla 1. Especificaciones del módulo Kyocera KC2000GT.

Parámetro	Valor	Unidades
N_s	54	–
I_{sc}	8.21	A
V_{oc}	32.9	V
V_{mpp}	26.3	V
I_{mpp}	7.61	A
α_i	0.00318	A/°C
α_v	-0.123	V/°C

Tabla 2. Parámetros estimados del módulo Kyocera KC2000GT.

Parámetro	Valor	Unidades
A	1.07534	–
R_s	0.284057	Ω
R_p	157.85322	Ω
I_{0n}	2.19541×10^{-9}	V
C	827.443	A/K°
V_{tn}	0.0256926	V

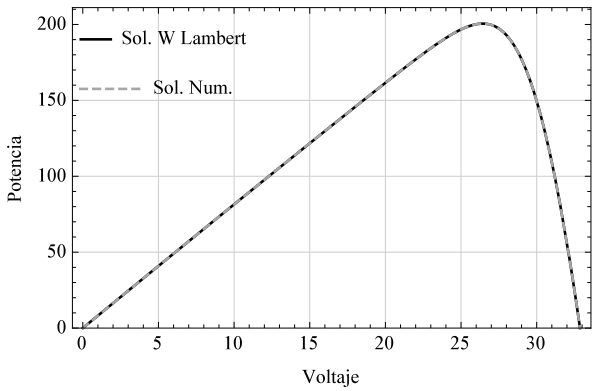


Figura 2. Potencia calculada resolviendo numéricamente (1) y utilizando la solución analítica (10).

En la tabla 3 y 4 se muestra una comparación tomando en cuenta diferentes valores de irradiancia y temperatura entre la aproximación dada por (15) y la solución numérica considerando la expresión (10). El criterio de comparación mostrado en la columna 4 es el error relativo porcentual dado por:

$$|Error| = \frac{|v_{num} - v_{apr}|}{v_{num}} \times 100\,\%, \tag{16}$$

En la figura 2 se muestra una comparación entre la solución numérica y la analítica dada por (10) en términos de la función W para la potencia. En la figura 3 se presenta la solución analítica dada por (10) y la aproximación dada por (12) señalando con un punto gris y negro el valor de voltaje obtenido numéricamente y por (15) respectivamente. Finalmente en las figura 4 y 5 se muestra la ruta que toma el voltaje donde se encuentra la potencia máxima encontrada numéricamente (puntos negros) y analíticamente (línea punteada), esto para diferentes valores de temperatura e irradiancia.

Tabla 3. Voltaje al cual se obtiene la potencia máxima del módulo considerando una temperatura constante de 25°C e irradiancia variable.

Irrad. (%)	Voltaje (V)		$\|Error\|$
	Aprox. Numérica	Aprox. Analítica	
100	26.4335	26.2578	0.664847
75	26.4950	26.4039	0.343943
50	26.3718	26.3828	0.041590
25	25.7589	25.9536	0.755826

ISSN en trámite

Tabla 4. Voltaje al cual se obtiene la potencia máxima del módulo considerando una irradiancia constante de 1000 W/m^2 y una temperatura variable.

Temp. (°C)	Voltaje (V)		$\|Error\|$
	Aprox. Numérica	Aprox. Analítica	
0	29.5817	29.4509	0.442302
25	26.4335	26.2578	0.664847
50	23.3217	23.0905	0.991288
75	20.2589	19.9589	1.480630

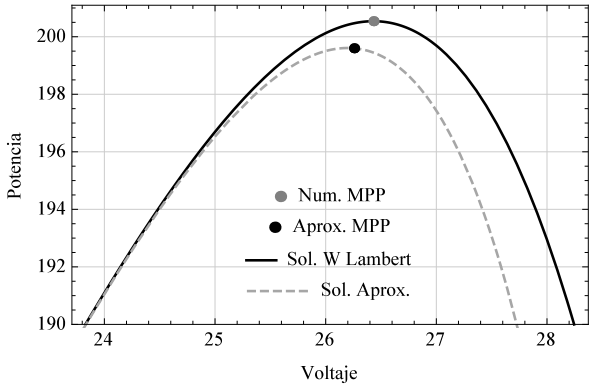


Figura 3. Comparación entre la aproximación (12) y la solución analítica (10) para el cálculo de la potencia y el MPP.

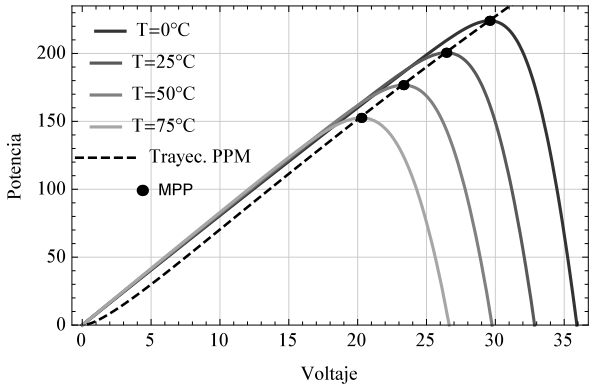


Figura 4. Trayectoria del punto máximo de potencia variando la temperatura y manteniendo la irradiancia fija (1000 W/m^2).

5. CONCLUSIÓN

Se encontró una expresión analítica en términos de la función W y los parámetros intrínsecos de módulo fotovoltaico que toma en cuenta tanto la resistencia en serie como la resistencia en paralelo en el modelo de diodo único. La presente solución muestra un buen desempeño con un error relativo porcentual menor al 1.5 %. Si bien se hecha mano de varias simplificaciones para obtener esta

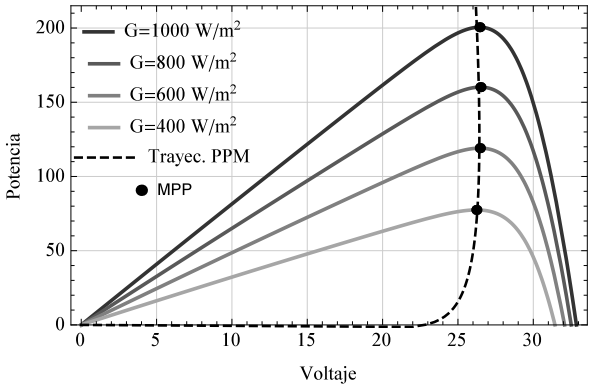


Figura 5. Trayectoria del punto máximo de potencia manteniendo la temperatura fija (25°C) y variando la irradiancia.

aproximación, esta es útil para analizar la variación del V_{mpp} en presencia de diferentes condiciones del entorno así como diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos, la cuales muestran diferentes parámetros característicos. Otra aplicación puede darse al tomar como valor inicial la presente estimación para el cálculo de voltaje máximo mediante algún método numérico. Finalmente siguiendo el procedimiento aquí mencionado es posible encontrar una expresión para calcular la corriente y la potencia máxima, lo cual puede ser abordado en trabajos futuros.

REFERENCIAS

Banwell, T. and Jayakumar, A. (2000). Exact analytical solution for current flow through diode with series resistance. *Electronics letters*, 36(4), 291–292.

Corless, R.M., Gonnet, G.H., Hare, D.E., Jeffrey, D.J., and Knuth, D.E. (1996). On the lambertw function. *Advances in Computational mathematics*, 5(1), 329–359.

Cubas, J., Pindado, S., and Sorribes-Palmer, F. (2017). Analytical calculation of photovoltaic systems maximum power point (mpp) based on the operation point. *Applied Sciences*, 7(9), 870.

Farivar, G., Asaei, B., and Rezaei, M.A. (2010). A novel analytical solution for the pv-arrays maximum power point tracking problem. In *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, 917–922. IEEE.

Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., and Vitelli, M. (2012). *Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems*. CRC Press.

Garcia, A.S. and Strandberg, R. (2021). Analytical modeling of the maximum power point with series resistance. *Applied Sciences*, 11(22), 10952.

Jain, A. and Kapoor, A. (2004). Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using lambert w-function. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 81(2), 269–277.

Jain, A. and Kapoor, A. (2005). A new method to determine the diode ideality factor of real solar cell

ISSN en trámite

using lambert w-function. *Solar energy materials and solar cells*, 85(3), 391–396.

Laudani, A., Lozito, G.M., Lucaferri, V., Radicioni, M., Fulginei, F.R., Salvini, A., and Coco, S. (2017). An analytical approach for maximum power point calculation for photovoltaic system. In *2017 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 1–4. IEEE.

Nassar-Eddine, I., Obbadi, A., Errami, Y., Agunaou, M., et al. (2016). Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the lambert w function: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 119, 37–48.

Olver, F.W., Lozier, D.W., Boisvert, R.F., and Clark, C.W. (2010). *NIST handbook of mathematical functions hardback and CD-ROM*. Cambridge university press.

Ortiz-Conde, A., Sanchez, F.J.G., and Muci, J. (2000). Exact analytical solutions of the forward non-ideal diode equation with series and shunt parasitic resistances. *Solid-State Electronics*, 44(10), 1861–1864.

Saloux, E., Teyssedou, A., and Sorin, M. (2011). Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. *Solar energy*, 85(5), 713–722.

ISSN en trámite

Review on circuits for hyperthermia application

S. A. Romano-García*, V. H. Olivares-Peregrino*, M. Ponce-Silva*

**Departamento de Ingeniería Electrónica, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México.*
e-mail: mario.ps@cenidet.tecnm.mx

Abstract: This paper summarizes the different specifications for the development of a circuit with hyperthermia application in cancer treatment. This review covers the advantages and disadvantages of each circuit, and the specifications they consider, such as: power, frequency, current and voltage. The highlight of this review is to provide a broad overview of the research conducted.

Keywords: Hyperthermia, resonant converter, fiber optic, high frequency.

1. INTRODUCTION

According to the World Health Organization (WHO) estimates, 19.2 million new cancer cases and 9.9 million deaths are expected by 2020 (Organization, 2020). With the increasing number of cancer cases every year, various treatments are being investigated to aid in the fight against this threat, especially nanomedical treatments, where nanoparticles are being used more in medical diagnostics and therapies. Different articles develop a technique as an alternative cancer treatment called Magnetic Hyperthermia Treatment (MHT) based on alternating magnetic fields (Salunkhe et al., 2014, Kashevsky et al., 2015).

Magnetic hyperthermia with magnetic nanoparticles, is a modern method that aims to target cancer cells selectively, provided that the nanoparticles are successfully delivered to the targeted biological tissue, where their excitation will result in increasing the ambient temperature to 43°C to 45°C, causing damage to cancer cells due to their low resistance to heat. In the case of healthy cells, they are not damaged because they have high heat resistance (Mahmoudi et al., 2011, Hedayatnasab et al., 2017, Soares et al., 2012).

The nanoparticles are made of iron oxide, which is a biocompatible material that can be used in the human body and does not harm it. These nanoparticles are magnetized by the applied magnetic field and begin to vibrate. This particle interaction generates mechanical energy, which is transformed into heat, thus destroying cancer cells (García et al., 2016, Jordan et al., 1999, Dürr et al., 2013, Mahmoudi et al., 2011, Kita et al., 2010).

The objective of this work is to evaluate the engineering feasibility of the different circuits with the specifications such as: power dissipation, magnetic field, power current and frequency.

2. SPECIFICATIONS

The specifications are important to define the design to be used. There are different typologies used for the application of hyperthermia. It is important to list the specifications that stand out in the review of the latest research (see Figure 1).

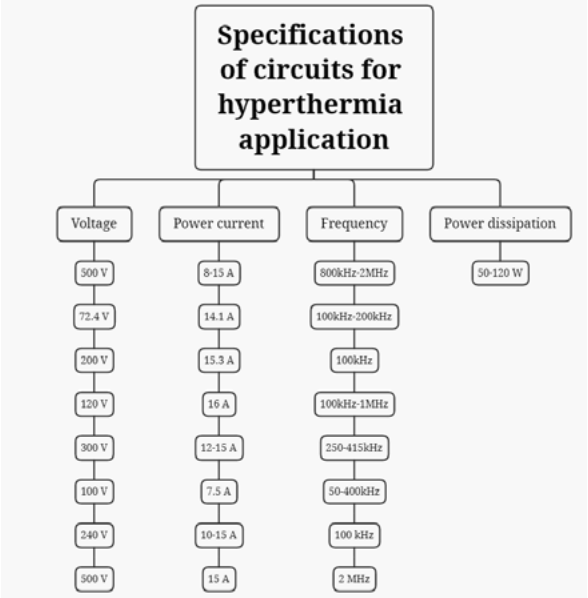


Fig. 1. Diagram of specifications in the circuits for hyperthermia applications

ISSN en trámite

2.1 Power current

The maximum current depends on the input voltage and the switching frequency.
Garcia shows the relationship between the current, voltage and frequency parameters that are involved in the converter (see Figure 2) (García et al., 2016).

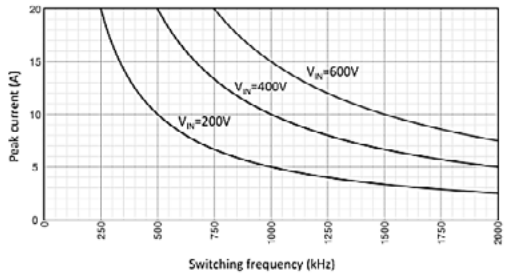


Fig. 2. Maximum peak current as a function of the input voltage and the switching frequency

It is necessary to optimize the power stage in order to minimize losses, this is done with a circuit that provides the desired current. As shown in Figure 1, the authors work with currents of 8 A-15 A, since it will also depend on the frequency to be used.

2.2 Frequency

The frequency is one of the most important parameters together with the magnetic field, a range of less than 1 MHz (in the case of the frequency) and 500 kA/m (in the case of the magnetic field) must be maintained, if these parameters are exceeded, it can cause damage to biological tissue (Hartwig et al., 2009, Cano et al., 2011, Vallejo-Fernandez et al., 2013).

Table 1. Parameters and compositions

Magnetic Field	Frequency	Nanoparticle compositions	Article
6.5 kA/m	400 kHz	30 g/L	(Häring et al., 2015)
24 kA/m	418.5 kHz	0.02-0.05 g/ml	(Zamora-Mora et al., 2015)
2-7 kA/m	50-100 kHz	3-8 mg/ml	(Raouf et al., 2021)
0-15 kA/m	300 kHz	0.033 g/ml	(Lahonian, 2013)
0-9.5 kA/m	141 kHz	0.05 g/ml	(Le Renard et al., 2011)
31.9-55.8 kA/m	375 kHz	4 mg/ml	(Myrovali et al., 2018)
3 kA/m	183 kHz	0.033 g/ml	(Salloum et al., 2008)

Table 1 shows the comparisons of different authors with respect to magnetic field and frequency, as well as nanoparticle compositions.

2.3 Power dissipation

In the hyperthermia procedure it is important to ensure that the local temperature does not exceed the limits, for this, it is necessary to determine the power dissipation in the magnetic nanoparticles in order to maximize the efficiency of the method (Tang et al., 2017, Liu and Cheng, 2019, Rosensweig, 2002).

For this type of applications, it is necessary to have MOSFET's that work at high frequencies, so we must design the circuit with a supply voltage according to this (Skumiel et al., 2016).

As shown in Table 2, there are different MOSFET's but the best is the silicon carbide because of their lower resistance and capacitance, which minimizes switching and conduction losses, thus making the circuit more efficient.

Table 2. Types of MOSFET's for hyperthermia application

Type	Symbol	Articles
Silicon Carbide	SiC	(Wu et al., 2015), (Zeinoun et al., 2021), (García et al., 2016), (Suárez et al., 2015), (Nomura and Isobe, 2018)
Silicon	Si	(Tai and Chen, 2007), (Calvache et al., 2020), (Hadadian et al., 2019), (Mohseni and Rajaei, 2017), (Gonzalez et al., 2017)
Gallium Nitride	GaN	(Sarnago et al., 2016)

3. GENERAL CIRCUIT

There are different circuit topologies proposed by several authors, these consist of essential parts (see Figure 3).

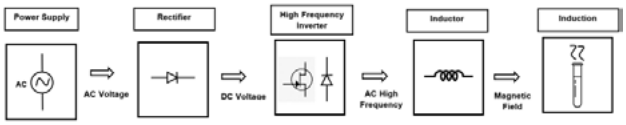


Fig. 3. Block diagram of the general circuit

3.1 Power inverter

The application of magnetic hyperthermia needs very specific parameters such as a high alternating magnetic field strength, for this reason, inverters are used (Wang et al., 2013).

ISSN en trámite

Several references propose different topologies, Sarnago proposes a class D resonant inverter (see Figure 4), due to its simplicity and easy control, this allows to work with high frequencies.

In the other hand, it presents a high-power density since it uses a GaN-based inverter. It is composed of two power devices that are driven by a controller and a DC-DC converter. This topology requires high performance bus capacitors to supply the high frequency current (Sarnago et al., 2016). Similarly, Tai proposes this same inverter (Tai and Chen, 2007).

Zuhe proposes a full-bridge inverter in parallel with SiC Schottky diodes (see Figure 5), this with the purpose of providing a follow current when inverting the inverter voltage (Wu et al., 2015). Garcia mentions that the biggest challenge to be met is to reduce power losses when operating in MHz frequency ranges (Zeinoun et al., 2021).

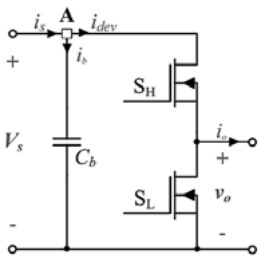


Fig. 4. Class D circuit

In hyperthermia, stability in field amplitude and frequency is required, for this reason, the authors opt for a full bridge since this topology allows control of both variables (Gonzalez et al., 2017).

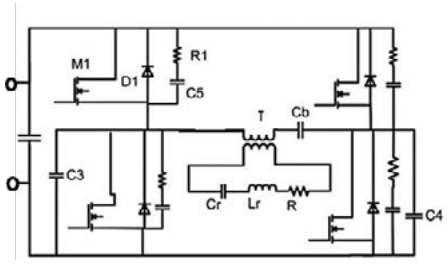


Fig. 5. Full bridge circuit

3.2 Resonant converters

A resonant network with a high-quality factor Q is needed to establish a high magnetic field value, which is uniformly distributed and confined in a given space. This situation implies small losses so that high currents and voltages are obtained in the L and C components (Gonzalez et al., 2017).

A resonant circuit with series and parallel topologies is best suited to the proposed needs. To choose the topology used for induction heating, it is necessary to know the power level and the accuracy required for the magnetic field (Steigerwald, 1988, Jain and Dewan, 1990, Takemura, 2011)

In this section it's important to define two configurations: series and parallel.

3.2.1 Series topology

It does not allow a static magnetic field in the inductor due to the presence of the capacitor. Because it has a high value of Q, it requires an extremely low voltage and a very high value of the current to be supplied by the power electronics converter.

It presents zero total impedance and voltage gain when the resonance condition is met (Mazon et al., 2017).

3.2.2 Parallel topology

It requires low current and very high voltage supply. It is the best solution for this application due to the low current amplitude required from the power electronics converter. It offers infinite current gain and impedance.

If there is a high magnetic field value, high electric currents of up to 200 A circulate in the coil of the resonant circuit. Therefore, Garaio proposes a parallel LCC circuit (Garaio et al., 2014).

3.3 Induction heating

Induction heating is a technology that has domestic, industrial and medical applications (Lucía et al., 2014). Hyperthermia is based on this method which consists of a coil that generates an alternating magnetic field, each author proposes a different design for the coil (Sarnago et al., 2017, Candeo and Dughiero, 2009).

Different designs are proposed to perform the heating of magnetic nanoparticles, one of them is an inductor with an air core to provide a high field and minimize the current. The parameters taken into account are: number of turns and their separation, as well as the wire diameter (Suárez et al., 2015).

On the other hand, they also use a wire coil and a ferrite core, this type of design is more complicated because it generates a higher frequency and a higher current(Tai and Chen, 2007).

Mazon designs a circuit consisting of an inductor Ls in series with a capacitor Cs, connected to an inductor Lp in parallel with a capacitor Cp (see Figure 6A). A high resonant current is present in the Lp inductor which produces the desired magnetic

ISSN en trámite

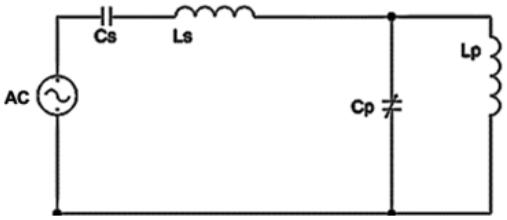
field, and this generates the heating of the nanoparticles (see Figure 6B) (Mazon et al., 2017).

3.4 Temperature control

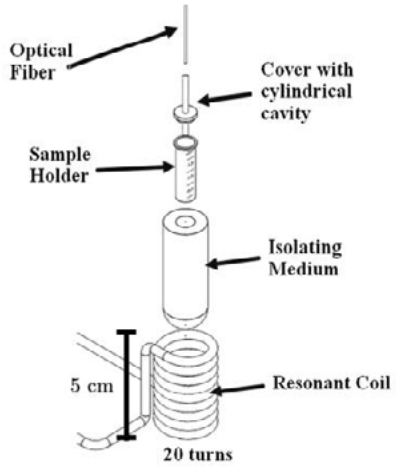
One of the most important aspects to consider in hyperthermia is the temperature. There are different ways to obtain this value, but it must be taken into account that a magnetic field is being generated, therefore, a special device must be used to obtain this measurement (Barrera et al., 2020),

Samples are taken in two ways: with and without nanoparticles, in order to analyses the temperature variations with respect to the magnetic field that is being applied (Lacroix et al., 2008).

Generally, the authors use a fiber optic sensor in the presence of the magnetic field (Mazon et al., 2017, Wu et al., 2015).The temperature from the nanoparticles dispersion shows a dependence on the magnetic susceptibility.



(A)



(B)

Fig. 6. A) Equivalent field generator circuit, and B) Internal structure of the coil

On the other hand, Jordan performs the measurements by applying the magnetic field for 30 seconds, removes it and places the sensor for one minute (Jordan et al., 1993).

Zeinoun places the sample with a layer of water that is constantly pumping at a temperature of 37° (Jordan et al., 1993), emulating the human body, and uses a Luxtron fiber optic sensor to obtain the data and display it on the LabVIEW interface (see Figure 7).

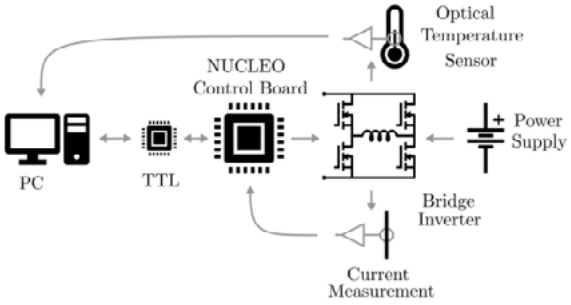


Fig. 7. Circuit diagram for hyperthermia

4. CONCLUSIONS

The application of hyperthermia has become increasingly important in recent years as it is presented as an alternative to conventional methods against cancer.

One of the most important variables in this application is the temperature, therefore, the ranges between 41° and 45° C must be respected. There are a variety of sensors for temperature data acquisition, but the most widely used is the fiber optic sensor, since it is not affected by magnetic fields and the measurement is accurate.

On the other hand, it is important to choose the right topology. According to the references, the most used topology is parallel and full bridge inverter, this is due to its high efficiency at high frequencies, since frequencies between 100 kHz and 1 MHz are used.

The references presented explain that there must be efficiency with respect to power and frequency, but there are details to be corrected, since certain aspects are sacrificed to obtain others.

REFERENCES

BARRERA, G., ALLIA, P. & TIBERTO, P. 2020. Temperature-dependent heating efficiency of magnetic nanoparticles for applications in precision nanomedicine. *Nanoscale,* 12**,** 6360-6377.

ISSN en trámite

CALVACHE, C., MERA-CÓRDOBA, J. & CORAL, D. 2020. *Designing a portable radiofrequency source for magnetic hyperthermia applications*.

CANDEO, A. & DUGHIERO, F. 2009. Numerical FEM Models for the Planning of Magnetic Induction Hyperthermia Treatments With Nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics,* 45**,** 1658-1661.

CANO, M. E., BARRERA, A., ESTRADA, J. C., HERNANDEZ, A. & CORDOVA, T. 2011. An induction heater device for studies of magnetic hyperthermia and specific absorption ratio measurements. *Review of Scientific Instruments,* 82**,** 114904.

DÜRR, S., SCHMIDT, W., JANKO, C., KRAEMER, H. P., TRIPAL, P., EIERMANN, F., TIETZE, R., LYER, S. & ALEXIOU, C. 2013. A Novel Magnetic Field Device for Inducing Hyperthermia Using Magnetic Nanoparticles. 58.

GARAIO, E., COLLANTES, J. M., PLAZAOLA, F., GARCIA, J A. & CASTELLANOS-RUBIO, I. 2014. A multifrequency eletromagnetic applicator with an integrated AC magnetometer for magnetic hyperthermia experiments. *Measurement Science and Technology,* 25.

GARCÍA, O., MORENO-ARRONES, N., CUESTA, A. B., GUTIERREZ, A., ALOU, P., OLIVER, J. A., COBOS, J. A., UCEDA, J., AZNAR, E., MARTÍNEZ-MÁÑEZ, R., SÁNCHEZ, C., CASANOVA, O. E., SERRANO, J. J. & POZO, F. D. 2016. Development and Testing of a New Instrument for Researching on Cancer Treatment Technologies Based on Magnetic Hyperthermia. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,* 4**,** 243-251.

GONZALEZ, S. A., SPINELLI, E. M., VEIGA, A. L., CORAL, D. F., RAAP, M. B. F. V., ZÉLIS, P. M., PASQUEVICH, G. A. & SÁNCHEZ, F. H. Portable electromagnetic field applicator for magnetic hyperthermia experiments. 2017 IEEE 8th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), 20-23 Feb. 2017 2017. 1-4.

HADADIAN, Y., AZIMBAGIRAD, M., NAVAS, E. A. & PAVAN, T. Z. 2019. A versatile induction heating system for magnetic hyperthermia studies under different experimental conditions. *Rev Sci Instrum,* 90**,** 074701.

HÄRING, M., SCHILLER, J., MAYR, J., GRIJALVO, S., ERITJA, R. & DÍAZ, D. 2015. Magnetic Gel Composites for Hyperthermia Cancer Therapy. *Gels,* 1**,** 135-161.

HARTWIG, V., GIOVANNETTI, G., VANELLO, N., LOMBARDI, M., LANDINI, L. & SIMI, S. 2009. Biological Effects and Safety in Magnetic Resonance Imaging: A Review. 6**,** 1778-1798.

HEDAYATNASAB, Z., ABNISA, F. & DAUD, W. M. A. W. 2017. Review on magnetic nanoparticles for magnetic nanofluid hyperthermia application. *Materials & Design,* 123**,** 174-196.

JAIN, P. K. & DEWAN, S. B. 1990. A performance comparison of full- and half-bridge series resonant inverters in high-frequency high-power applications. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 26**,** 317-323.

JORDAN, A., SCHOLZ, R., WUST, P., FÄHLING, H. & ROLAND, F. 1999. Magnetic fluid hyperthermia (MFH): Cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 201**,** 413-419.

JORDAN, A., WUST, P., FÄHLING, H., JOHN, W., HINZ, A. & FELIX, R. 1993. Inductive heating of ferrimagnetic particles and magnetic fluids: physical evaluation of their potential for hyperthermia. *Int J Hyperthermia,* 9**,** 51-68.

KASHEVSKY, B. E., KASHEVSKY, S. B., KORENKOV, V. S., ISTOMIN, Y. P., TERPINSKAYA, T. I. & ULASHCHIK, V. S. 2015. Magnetic hyperthermia with hard-magnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 380**,** 335-340.

KITA, E., KAYANO, T., SATO, S., MINAGAWA, M., YANAGIHARA, H., KISHIMOTO, M., ODA, T., HASHIMOTO, S., YAMADA, K., OHKOHCHI, N. & MITSUMATA, C. 2010. Ferromagnetic nanoparticles for magnetic hyperthermia and thermoablation therapy. *Journal of Physics D, Applied Physics,* 43**,** 9.

LACROIX, L. M., CARREY, J. & RESPAUD, M. 2008. A frequency-adjustable electromagnet for hyperthermia measurements on magnetic nanoparticles. *Rev Sci Instrum,* 79**,** 093909.

LAHONIAN, M. 2013. Diffusion of Magnetic Nanoparticles Within a Biological Tissue During Magnetic Fluid Hyperthermia. InTech.

LE RENARD, P.-E., LORTZ, R., SENATORE, C., RAPIN, J.-P., BUCHEGGER, F., PETRI-FINK, A., HOFMANN, H., DOELKER, E. & JORDAN, O. 2011. Magnetic and in vitro heating properties of implants formed in situ from injectable formulations and containing superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs) embedded in silica microparticles for magnetically induced local hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 323**,** 1054-1063.

LIU, K.-C. & CHENG, P.-J. 2019. Numerical analysis of power dissipation requirement in magnetic hyperthermia problems. *Journal of Thermal Biology,* 86**,** 102430.

LUCÍA, O., MAUSSION, P., DEDE, E. J. & BURDÍO, J. M. 2014. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 61**,** 2509-2520.

MAHMOUDI, M., SANT, S., WANG, B., LAURENT, S. & SEN, T. 2011. Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs): development, surface modification and applications in chemotherapy. *Adv Drug Deliv Rev,* 63**,** 24-46.

MAZON, E. E., VILLA-MARTÍNEZ, E., HERNÁNDEZ-SÁMANO, A., CÓRDOVA-FRAGA, T., IBARRA-SÁNCHEZ, J. J., CALLEJA, H. A., LEYVA CRUZ, J. A., BARRERA, A., ESTRADA, J. C., PAZ, J. A., QUINTERO, L. H. & CANO, M. E. 2017. A high-resolution frequency variable experimental setup for studying ferrofluids used in magnetic hyperthermia. *Rev Sci Instrum,* 88**,** 084705.

ISSN en trámite

MOHSENI, M. & RAJAEI, A. J. S. I. 2017. Design of Alternating Magnetic Field Generator for Magnetic Fluid Hyperthermia Research Application. 25**,** 3507-3516.

MYROVALI, E., MANIOTIS, N., MAKRIDIS, A., SIMEONIDIS, K., SAMARAS, T. & ANGELAKERIS, M. Regional Focus effect on Magnetic Particle Hyperthermia efficiency. 2018 EMF-Med 1st World Conference on Biomedical Applications of Electromagnetic Fields (EMF-Med), 10-13 Sept. 2018 2018. 1-2.

NOMURA, S. & ISOBE, T. 2018. Design Study on High-Frequency Magnets for Magnetic Hyperthermia Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity,* 28**,** 1-7.

ORGANIZATION, W. H. 2020. Cancer Fact Sheet. *The Global Cancer Observatory***,** 1-2.

RAOUF, I., GAS, P. & KIM, H. S. 2021. Numerical Investigation of Ferrofluid Preparation during In-Vitro Culture of Cancer Therapy for Magnetic Nanoparticle Hyperthermia. 21**,** 5545.

ROSENSWEIG, R. E. 2002. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 252**,** 370-374.

SALLOUM, M., MA, R. H., WEEKS, D. & ZHU, L. 2008. Controlling nanoparticle delivery in magnetic nanoparticle hyperthermia for cancer treatment: experimental study in agarose gel. *Int J Hyperthermia,* 24**,** 337-45.

SALUNKHE, A. B., KHOT, V. M. & PAWAR, S. H. 2014. Magnetic hyperthermia with magnetic nanoparticles: a status review. *Curr Top Med Chem,* 14**,** 572-94.

SARNAGO, H., LUCIA, O. & BURDIO, J. M. High frequency and power density gallium nitride based inverter for magneto fluid hyperthermia. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 23-26 Oct. 2016 2016. 5222-5225.

SARNAGO, H., Ó, L. & BURDÍO, J. M. 2017. Interleaved Resonant Boost Inverter Featuring SiC Module for High-Performance Induction Heating. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 32**,** 1018-1029.

SKUMIEL, A., LESZCZYŃSKI, B., MOLCAN, M. & TIMKO, M. 2016. The comparison of magnetic circuits used in magnetic hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 420**,** 177-184.

SOARES, P. I., FERREIRA, I. M., IGREJA, R. A., NOVO, C. M. & BORGES, J. P. 2012. Application of hyperthermia for cancer treatment: recent patents review. *Recent Pat Anticancer Drug Discov,* 7**,** 64-73.

STEIGERWALD, R. L. 1988. A comparison of half-bridge resonant converter topologies. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 3**,** 174-182.

SUÁREZ, O. G., BRAVO, A., ARRONES, N. M., GUTIÉRREZ, A., CERVERA, P. A., RAMÍREZ, J. A. O., MÁRQUEZ, J. A. C., ANTOLÍN, J., AZNAR, E., MARTÍNEŠ MÁÑEZ, R., SÁNCHEZ, C., CASANOVA, O. E., SERRANO, J. J. & POZO, F. D. Configurable Power Inverter for Magnetic Hyperthermia for Cancer Treatment Purpose. 2015.

TAI, C.-C. & CHEN, M.-K. 2007. A compact half-bridge induction heating system for magnetic nanoparticle thermotherapy applications. *Biomedical Engineering-applications Basis Communications - BIOMED ENG-APPL BASIS COMMUN,* 19.

TAKEMURA, Y. 2011. Resonant circuit as magnetic device for cancer therapy. *Journal of Physics: Conference Series,* 263.

TANG, Y., FLESCH, R. C. C. & JIN, T. 2017. Numerical analysis of temperature field improvement with nanoparticles designed to achieve critical power dissipation in magnetic hyperthermia. 122**,** 034702.

VALLEJO-FERNANDEZ, G., WHEAR, O., ROCA, A. G., HUSSAIN, S., TIMMIS, J., PATEL, V. & O'GRADY, K. 2013. Mechanisms of hyperthermia in magnetic nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics,* 46**,** 312001.

WANG, X., CHEN, Y., HUANG, C., WANG, X., ZHAO, L., ZHANG, X. & TANG, J. 2013. Contribution of a 300 kHz alternating magnetic field on magnetic hyperthermia treatment of HepG2 cells. *Bioelectromagnetics,* 34**,** 95-103.

WU, Z., ZHUO, Z., CAI, D., WU, J., WANG, J. & TANG, J. 2015. An induction heating device using planar coil with high amplitude alternating magnetic fields for magnetic hyperthermia. *Technol Health Care,* 23 Suppl 2**,** S203-9.

ZAMORA-MORA, V., SOARES, P. I. P., ECHEVERRIA, C., HERNÁNDEZ, R. & MIJANGOS, C. 2015. Composite Chitosan/Agarose Ferrogels for Potential Applications in Magnetic Hyperthermia. 1**,** 69-80.

ZEINOUN, M., SERRANO, D., MEDINA, P. T., Ó, G., VASIĆ, M. & SERRANO-OLMEDO, J. J. 2021. Configurable High-Frequency Alternating Magnetic Field Generator for Nanomedical Magnetic Hyperthermia Applications. *IEEE Access,* 9**,** 105805-105816.

ISSN en trámite

Control predictivo de un inversor multinivel de capacitores flotantes.

García Valenzuela Leticia, Hernández Gutiérrez Claudia V, López Tapia Héctor Juan Carlos, Vaquero López Joaquín, Vázquez Nava Nimrod.

*Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México(m2003060@itcelaya.edu.mx)
**Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México(claudia.hernandez@itcelaya.edu.mx)
***Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México (hector.lopez@itcelaya.edu.mx)
****Universidad Rey Juan Carlos, Campus de Móstoles (joaquin.vaquero@urjc.es)
*****Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México (nimrod.vazquez@itcelaya.edu.mx)

Abstract: This article presents the simulation results in the PSIM software of a previously proposed inverter, based on the topology of a multilevel inverter with voltage-fed floating capacitors, for the generation of eight output voltage levels, as well as the proposal of a finite set model predictive control to maintain the balance in voltage in both capacitors and the current in the network, the results are presented with different initial conditions and different references.

Resumen: En este artículo se presentan los resultados de simulación en el software de PSIM de un inversor previamente propuesto, basándose en la topología de inversor multinivel de capacitores flotantes alimentado en tensión, para la generación de ocho niveles de tensión a la salida, así como la propuesta de un control predictivo de modelo de conjuntos finitos para mantener el balance en tensión en ambos capacitores y la corriente en la red, los resultados se presentan con diferentes condiciones iniciales y diferentes referencias.

Palabras clave: Energías renovables, Inversor multinivel de capacitores flotantes, control predictivo, estados de conmutación, modelo predictivo.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, se ha incrementado el interés y la necesidad del cuidado de medio ambiente, debido a la contaminación y el calentamiento global, esta problemática es de interés colectivo en donde industrias e investigadores han ido involucrándose en buscar nuevas tecnologías y estrategias para satisfacer las necesidades enérgicas de una manera amigable con el medio ambiente. En el área de electrónica de potencia, los investigadores han realizado grandes avances en vehículos híbridos, centros de carga, y en sistemas para calidad de energía (B. K. Bose, 2017).

Dentro de las principales problemáticas sociales y ecológicas que se buscan satisfacer y minimizar con las investigaciones en términos de consumo energético, es compensar las necesidades de abasto de energía, considerando el incremento constante de la población, ya que el pretender seguir suministrando energía proveniente de combustibles fósiles es costoso además de que son recursos no renovables, lo cual genera efectos negativos al medio ambiente como lo es lluvia ácida y cambio climático en general. (F. J. C. Ramírez,2018, A. G. Sánchez Reyna,2016).

Por ello hoy en día, se ha generado un mayor interés en el estudio de los convertidores de potencia CD-CA, también conocidos como inversores; los inversores son dispositivos ampliamente utilizados para convertir corriente continua proveniente de energía renovable, a corriente alterna, con una magnitud y frecuencia deseadas. Para aplicaciones de baja potencia se pueden aceptar voltajes de onda cuadrada o cuasicuadrada, en cambio para aplicaciones de mediana y alta potencia se requieren de formas de onda senoidal con poca distorsión armónica. (M. del C. Toledo Pérez,2022). Debido a esta necesidad en las últimas décadas, se han presentado las configuraciones de inversores multinivel MLI por sus siglas en inglés, estos han sido altamente utilizados debido a que operan con altas potencias y su respuesta de salida es con baja distorsión armónica, además de que los esfuerzos en los componentes semiconductores disminuyen. (J. O. Caira Noa,2017).

Debido a estas necesidades se decidió trabajar con una topología MLI, la cual ya se ha propuesto anteriormente, específicamente un inversor multinivel de capacitores flotantes, en este trabajo se propone mantener el balance de los capacitores mediante control predictivo de modelo de conjuntos finitos.

ISSN en trámite

1.1. Inversor multinivel

Los inversores multinivel, tienen la misma función que los inversores de dos niveles de convertir señales de corriente directa a alterna, sus aplicaciones han ido aumentando debido a la necesidad de utilizar energía renovable, y principalmente para aplicaciones donde se requiera una baja distorsión armónica, los inversores son sistemas formados por un conjunto de interruptores de potencia, fuentes de tensión, capacitores y diodos, donde mediante técnicas de control se forma una secuencia en la activación de los interruptores para obtener una tensión a la salida escalonada, con distintos niveles de tensión para simular a una onda senoidal.(A. Rodríguez José Juan,2018, F. M. Guerrero Moreta, 2021). Las principales topologías de inversores multinivel son: Inversor con diodo de fijación, inversor con conexión en cascada de fuentes, inversor de capacitores flotantes. En este artículo se realizó el control predictivo para una topología propuesta anteriormente de inversor multinivel de capacitores flotantes por (A. Rodríguez José Juan,2018) se da a conocer las principales características de los inversores multinivel de capacitores flotantes en (M. H. Rashid,2004).

1.2 Inversor multinivel de capacitores flotantes.

El inversor con capacitores flotantes, al igual que el inversor multinivel por fijación de diodos NPC por sus siglas en inglés, se compone de condensadores que actúan como bus de DC que a su vez están conectados a una fuente de alimentación de DC, los capacitores son utilizados para generar los niveles de tensión en la salida. Las ventajas que tienen los inversores multinivel de capacitores flotantes, CMCF por sus siglas en inglés, es que solo requiere solo una fuente de alimentación, no requiere de diodos de fijación, además cuando la cantidad de niveles es lo suficientemente alta el contenido armónico es menor y, por tanto, no es necesario añadir filtros en la salida. Las desventajas que puede llegar a tener es que debido a la necesidad de aumentar niveles requiere de mayor cantidad de capacitores e interruptores esto lo hace voluminoso y costoso, el control es más complejo debido que la tensión en los capacitores se desbalancea. De acuerdo con (A. Rodríguez José Juan,2018) la topología que se muestra en la Fig.1, es un inversor de capacitores flotantes el cual consta de 12 dispositivos de conmutación MOSFET $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, S'_5, S'_6$, dos capacitores C_1, C_2 , una fuente de alimentación V_{DC} y a la salida el inductor L_F , una resistencia R_F conectado a la red eléctrica. Con base a este inversor se realizó el análisis para el control predictivo.

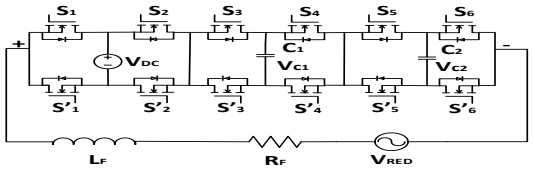


Fig. 1. Inversor multinivel de capacitores flotantes.

De acuerdo con esta topología que se muestra en la Fig. 1 se obtienen 27 modos de operación, los cuales se obtienen con diferentes estados de interruptores como se muestra en la tabla 1, el estado de los interruptores inferiores del inversor son el complemento de $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$.

Si consideramos que las tensiones de los capacitores corresponden a ½ y ¼ de la fuente de alimentación es decir que si $V_{c1} = \frac{V_{DC}}{2}$ y si $V_{c2} = \frac{V_{DC}}{4}$ se podrían considerar como un inversor de 16 niveles para formar un voltaje escalonado, como se muestra en la Fig. 2 y los otros 11 corresponden a modos redundantes los cuales se incluyen para el control.

Tabla 1. Modos de conmutación de topología propuesta.

		Estado de interruptores					
Modo	Operación	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	$V_{DC} + V_{C1} + V_{C2}$	1	0	1	0	1	0
2	$V_{DC} + V_{C1}$	1	0	1	0	0	0
3	$V_{DC} + V_{C2}$	1	0	0	0	1	0
4	$V_{DC} + V_{C1} - V_{C2}$	1	0	1	0	0	1
5	V_{DC}	1	0	0	0	0	0
6	$V_{C1} + V_{C2}$	1	1	1	0	1	0
7	$V_{DC} - V_{C2}$	1	0	0	0	0	1
8	$V_{DC} - V_{C1} + V_{C2}$	1	0	0	1	1	0
9	V_{C1}	1	1	1	0	0	0
10	$V_{DC} - V_{C1}$	1	0	0	1	1	1
11	V_{C2}	1	1	1	1	1	0
12	$V_{C1} - V_{C2}$	1	1	1	0	0	1
13	$V_{DC} - V_{C1} - V_{C2}$	1	0	0	1	0	1
14	0	1	1	1	1	1	1
15	$-V_{C2}$	0	0	0	0	0	1
16	$-(V_{C1} - V_{C2})$	0	0	0	1	1	0
17	$-(V_{DC} - V_{C1} - V_{C2})$	0	1	1	0	1	0
18	$-(V_{C1})$	0	0	0	1	1	1
19	$-(V_{DC} - V_{C1})$	0	1	1	0	0	0
20	$-(V_{C1} - V_{C2})$	0	0	0	1	0	1
21	$-(V_{DC} - V_{C2})$	0	1	1	1	1	0
22	$-(V_{DC} - V_{C1} + V_{C2})$	0	1	1	0	0	1
23	$-(V_{DC})$	0	1	1	1	1	1
24	$-(V_{DC} + V_{C1})$	0	1	1	1	0	1
25	$-(V_{DC} + V_{C1} - V_{C2})$	0	1	0	1	1	0
26	$-(V_{DC} + V_{C2})$	0	1	0	1	1	1
27	$-(V_{DC} + V_{C1} + V_{C2})$	0	1	0	1	0	1

ISSN en trámite

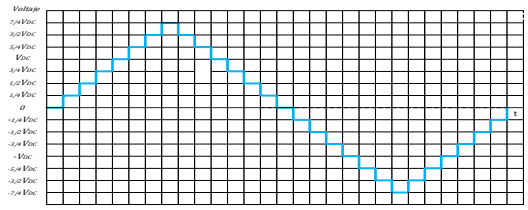


Fig. 2. Tensión escalonada de 16 niveles.

2. CONTROL PREDICTIVO FS-MPC.

El control predictivo basado en modelos MPC por sus siglas en inglés, es implementado en un amplio rango de aplicaciones (Í. R,2015) debido a que su respuesta dinámica rápida, la función de costo puede contener restricciones para mejorar eficiencia y tiempos de respuesta, sin embargo, una de sus principales desventajas es la carga computacional. Se generalizan en dos tipos, el modelo predictivo de estados continuos CS-MPC por sus siglas en inglés, y el modelo predictivo de estados finitos FS-MPC. El CS-MPC consiste en la solución de sus estados en un rango continuo con una etapa de modulación para la asignación de los estados de los interruptores, a diferencia del FS-MPC el cual es una discretización del modelo del convertidor y la carga. (L. Yan,2020). Este además de su alta carga computacional tiene otras desventajas como un modelo matemático predictivo complejo usualmente para aplicaciones de inversores multinivel, no es capaz de mantener una frecuencia de conmutación fija. Sin embargo, de acuerdo con (Z. Huang et al, 2019, Cesar silva,2016) la técnica de MPC ha incrementado su atención debido a que su rápida respuesta dinámica, por la habilidad de incluir restricciones y linealidades y ya que puede hacer el control de múltiples variables como pueden ser la tensión y corriente del inversor.

Haciendo referencia a la Fig.3, se tiene un diagrama de bloques que consta de dos etapas la parte de potencia y control en la cual se conjunta las partes en las que se conformó del control que se simuló en PSIM.

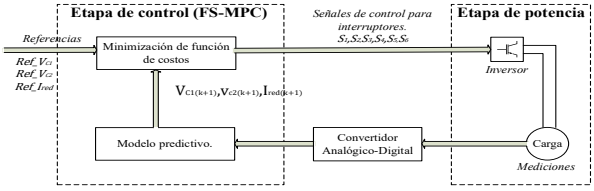


Fig. 3. Diagrama de bloques para control predictivo FS-MPC.

2.1 Modelo Predictivo.

Para el modelo predictivo se realizó mediante la respuesta completa de los subcircuitos de todas las operaciones mostradas en la tabla 1, el modelo predictivo se evaluó en una muestra posterior, esta evaluación se denota como $k+1$ y tiempo de muestreo de 10us.

Análisis de modo 2: De acuerdo con la tabla 1 para el análisis del modo de operación 1 tenemos que los interruptores S1, S2, S3, S4, S5, S6 son igual a 1,0,1,0,0,0 siendo que el estado de los interruptores como anteriormente se mencionó son complementarios, el flujo de corriente de acuerdo con ello es el que se muestra en la Fig. 4.

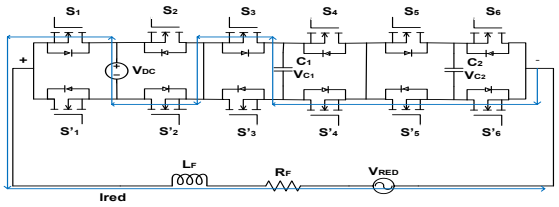


Fig. 4. Análisis de flujo de corriente para modo de conmutación 2.

Se simplificó el inversor a un subcircuito equivalente como el de la Fig. 5, para obtener la sumatoria de los voltajes (1) a través de la malla en el sentido que se muestra.

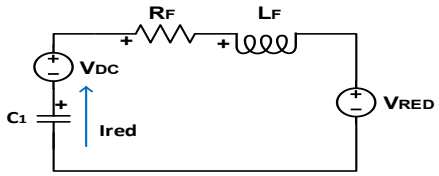


Fig. 5. Subcircuitos para modo de conmutación 2.

$$-V_{C1} - V_{DC} + V_{RF} + V_{LF} + V_{RED} = 0 \quad (1)$$

La ecuación (1) puede expresarse en términos de la corriente del capacitor (2) donde la corriente de la malla es igual a la del capacitor1, por tanto, tenemos que; $C_1 \frac{d}{dt} V_{C1} = I_{c1}$ y $s = \frac{d}{dt}$.

$$-V_{C1} + (R_F + L_F S) C_1 \frac{d}{dt} V_{C1} = V_{DC} - V_{RED} \quad (2)$$

Entonces, la ecuación (2) se puede expresar como la ecuación diferencial (3).

$$\frac{d^2}{dt^2} V_{C1} + \frac{R_F}{L_F} \frac{d}{dt} V_{C1} - \frac{V_{C1}}{L_F C_1} = \frac{(V_{DC} - V_{RED})}{L_F C_1} \quad (3)$$

De la ecuación 3 se obtiene la respuesta forzada (4).

$$yp = -(V_{DC} - V_{RED}) \quad (4)$$

Al resolver la ecuación homogénea se obtuvieron las raíces m_1 y m_2 , para obtener la expresión de la tensión en el capacitor1 $V_{C1}(k+1)$ se consideró los valores de la tabla 2 para el diseño

ISSN en trámite

del inversor, con los cuales se obtienen valores de raíces reales y diferentes. Las raíces se obtuvieron con la ecuación general (5).

$$m_1, m_2 = \frac{-\frac{R_F}{L_F} \pm \sqrt{\frac{R_F}{L_F}^2 - \frac{4}{L_F C_1}}}{2} \quad (5)$$

Tabla 2. Valores de componentes en inversor multinivel.

V_{DC}	180 v
V_{RED}	170 v
C_1	470uF
C_2	470uF
R_F	5
L_F	1mH

Con (6), se expresa el modelo predictivo para la tensión del capacitor1, $V_{C1}(k+1)$.

$$V_{C1}(k+1) = Ae^{m_1 k+1} + Be^{m_1 k+1} - (V_{DC} - V_{RED}) \quad (6)$$

Para determinar los valores de las constantes A y B de la ecuacion (6), se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones de 2x2, considerando que la tensión inicial del capacitor1 está dada por $-V_{C1}(0)$.

$$\left.\begin{aligned} &A + B \\ &= -V_{C1}(0) + (V_{DC} - V_{RED}) \\ &Am_1 + Bm_1 = \frac{I_{red}(0)}{C_{eq}} \end{aligned}\right\} \text{Sistema de ecuaciones}$$

La tensión del capacitor2 es (7) mientras que (8) la corriente en la malla donde C_1 es la capacitancia del capacitor1 y $V_{C2}(0)$ es la condición inicial en voltaje para el capacitor2.

$$V_{C2}(k+1) = V_{C2}(0) \quad (7)$$

$$I_{red}(k+1) = C_1\left[Am_1 e^{m_1 k+1} + Bm_2 e^{m_2 k+1}\right] \quad (8)$$

2.2. Función de costo minimizada.

La función de costo minimizada que se utilizó para este trabajo es (8), donde se muestra la resta de la referencia de la variable muestreada menos el valor del modelo predictivo en $(k+1)$. (L. Wang,2015).

$$J = |R_{ef\_}I_{red(k+1)} - I_{red(k+1)}| + |R_{ef\_}V_{C1(k+1)} - V_{C1(k+1)}| + |R_{ef\_}V_{C2(k+1)} - V_{C2(k+1)}| \quad (9)$$

3. RESULTADOS

Prueba 1: Para esta prueba las condiciones iniciales de los capacitores son: $V_{c1} = 0v$ $V_{c2} = 0v$ y la referencia de corriente es de 3 A en CA $R_{ef\_}I_{red} = 3A$, $R_{ef\_}V_{C1} = 80v$, $R_{ef\_}V_{C2} = 40v$ los resultados obtenidos son los que se muestran en la Fig. 6.

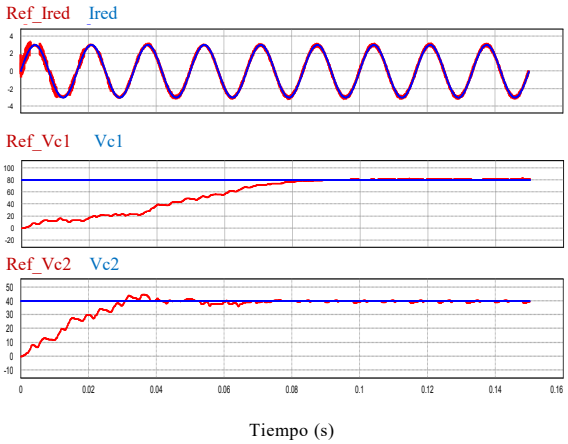


Fig. 6. Respuesta de control prueba 1.

Prueba 2: Para esta prueba las condiciones iniciales de los capacitores son: $V_{c1} = 82v$ $V_{c2} = 42v$ y la referencia de corriente es de 6A en CA $R_{ef\_}I_{red} = 6A$ con distorsión, $R_{ef\_}V_{C1} = 80v$, $R_{ef\_}V_{C2} = 40v$. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la Fig. 7.

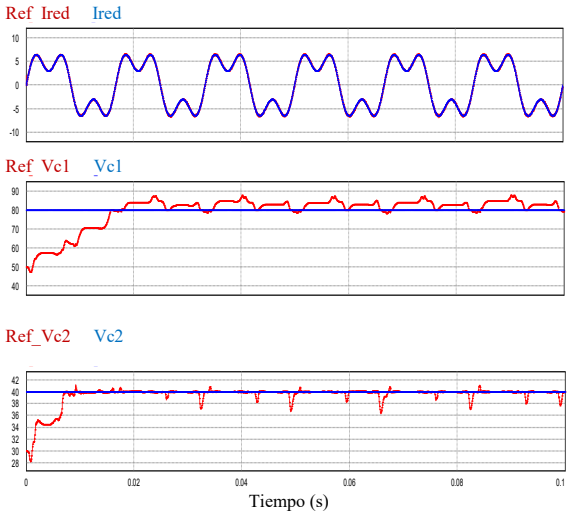


Fig. 7. Respuesta de control prueba 2.

Prueba 3: Para esta prueba las condiciones iniciales de los capacitores son: $V_{c1} = 82v$ $V_{c2} = 38v$ y $R_{ef\_}I_{red} = 6A$ en CA. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la Fig. 8.

ISSN en trámite

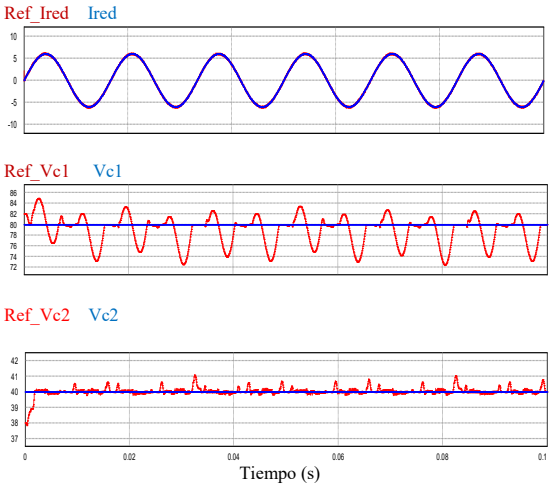


Fig. 8. Respuesta de control prueba 3.

Prueba 4: Para esta prueba las condiciones iniciales de los capacitores son: $V_{c1} = 78v$ $V_{c2} = 42v$ y la referencia de corriente es de 3A en CA $R_{ef\_}I_{red} = 5A$. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la Fig. 7.

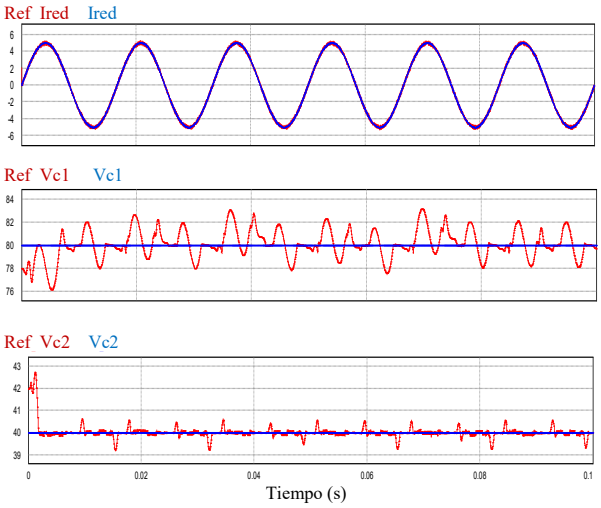


Fig. 9. Respuesta de control prueba 4.

Prueba 5: Se realizó una prueba en donde el sistema comienza con las siguientes condiciones iniciales; $V_{c1} = 73v$ $V_{c2} = 42v$ y las referencias a seguir cambien en lapsos de tiempo como se muestra en la ecuación (10). Vea la Fig.10.donde se muestran los resultados.

$$\text{Ref\_Ired} = \begin{cases} 3\text{sen}(120\pi t) \text{ para } [0,0.2]U(0.3,\infty) \\ 4\text{sen}(120\pi t) \text{ para } (0.2,0.3] \end{cases}$$

$$\text{Ref\_Vc1} = \begin{cases} 80 \text{ para } [0,0.2] \\ 85 \text{ para } (0.2,\infty] \end{cases}$$

$$\text{Ref\_Vc2} = \begin{cases} 40 \text{ para } [0,0.15] \\ 35 \text{ para } (0.15,\infty] \end{cases} \quad (10)$$

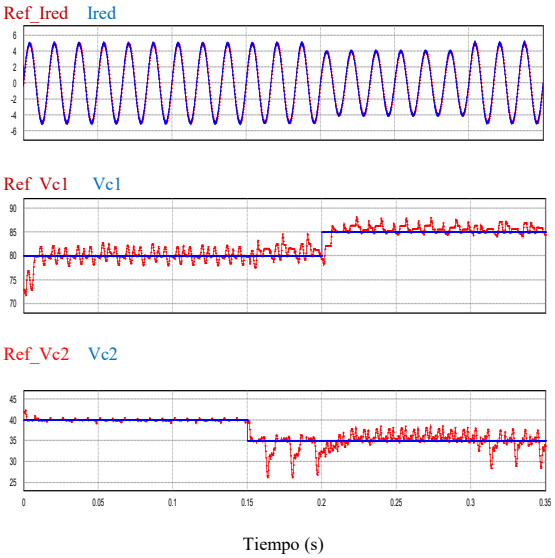


Fig. 10. Respuesta de control prueba 5.

Prueba 6: A la salida del inversor se conectó un convertidor Buck para analizar el comportamiento del control, además de medir la distorsión armónica en la corriente de Ired con el convertidor, el convertidor Buck trabaja a una frecuencia de 100KHz. En la Fig.11 se muestra el inversor de simulación en PSIM.

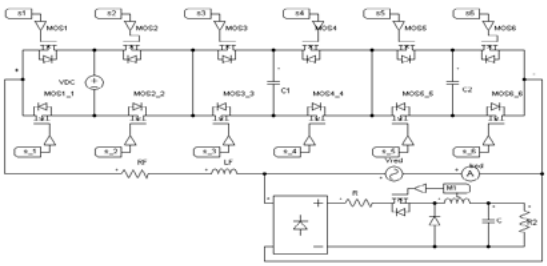
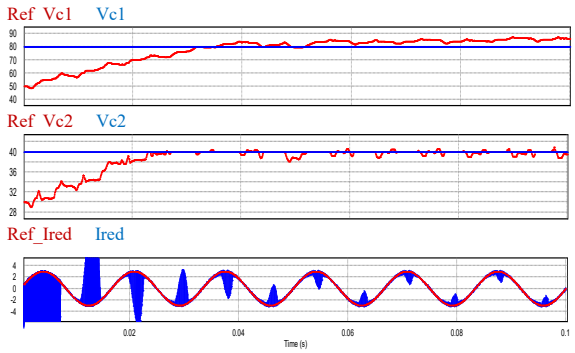


Fig.11. Inversor multinivel de capacitores flotantes en PSIM

En la Fig.12 se muestra el comportamiento del control para el voltaje en los capacitores, y de la corriente de Ired de acuerdo con el circuito de la Fig.11, la distorsión armónica total que se

ISSN en trámite

calculó en el simulador fue de 2.172981. En general no es una distorsión alta, por lo cual se puede concluir que a medida que los niveles de voltaje aumentan en el inversor multinivel, la distorsión armónica disminuye.



Tiempo (s)

Fig. 12. Respuesta de control prueba 6.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos obtenidos de la simulación, se concluye que los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que el control responde de manera rápida y eficiente ante perturbaciones programadas, además de que el THD de la corriente en la red es pequeña, respuesta esperada para de un inversor multinivel.

5. REFERENCIAS

A. G. Sánchez Reyna, F. E. López Monteagudo, y J. de la Torre y Ramos, Análisis de Inversores Monofásicos Multinivel, Analysis of Single-Phase Multilevel Inverters, ene. 2016,

B. K. Bose, Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems, Proceedings of the IEEE, vol. 105, n.º 11, pp. 2011-2018, nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2745621.

Cesar silva, Jose Rodriguez, Control predictivo de velocidad y corriente en cascada en accionamientos ,2016.

F. M. Guerrero Moreta y P. A. Montaluisa Taco, Estudio comparativo de las tres topologías clásicas de los inversores multinivel controlados mediante modulación SPWM y un motor de inducción tipo jaula de ardilla como carga., ago. 2021, Disponible en: http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7920

F. J. C. Ramírez, H. J. C. L. Tapia, N. V. Nava, y C. V. H. Gutiérrez, Análisis de Inversores Multinivel Alimentados en Tensión con Capacidad de Elevación, Pistas Educativas, vol. 33, n.º 103, Art. n.º 103, may 2018, Disponible en: http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1318

Í. R. Mogrovejo Peñaloza, Control predictivo generalizado aplicado a un inversor multinivel en cascada para diseño de un filtro activo de potencia, 2015.

J. O. Caira Noa, Análisis del espectro de frecuencia de un inversor multinivel con modulación por pulso único y modulación por ancho de pulso sinusoidal, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2017, Disponible en: http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2527

L. Tapia Héctor Jua, A. Rodríguez Jose Juan, D. Gonzalez Aurelio, y R. Reséndiz Juvenal, Eight Levels Multilevel Voltage Source Inverter Modulation Technique, IEEE Latin America Transactions, vol. 16, n.º 4, pp. 1121-1127, abr. 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8362146

L. Yan, F. Wang, M. Dou, Z. Zhang, R. Kennel, y J. Rodríguez, Active Disturbance-Rejection-Based Speed Control in Model Predictive Control for Induction Machines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, n.º 4, pp. 2574-2584, abr. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2912785.

L. Wang, S. Chai, D. Yoo, L. Gan, y K. Ng, PID and Predictive Control of Electrical Drives and Power Converters using MATLAB / Simulink. John Wiley & Sons, 2015.

M. del C. Toledo Pérez, Convertidor CD-CA Conectado a la Red Eléctrica con Funciones de Mejora, feb. 2022, Disponible en: https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/3014

M. H. Rashid, Electrónica de potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones., México: Tercera Edición, Pearson Educación, 2004.

Z. Huang et al., Voltage Utilization Enhancement of Dual Inverters by Model Predictive Control for Motor Drive Applications, en 2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), may 2019, pp. 1-3. doi: 10.1109/PRECEDE.2019.8753341.

ISSN en trámite

Comparación de metodologías de control multivariable para un aerogenerador

Randy Guzmán* **Guadalupe López López** ** **Victor M. Alvarado*****

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.
e-mail: m20ce076@cenidet.tecnm.mx *, guadalupe.ll@cenidet.tecnm.mx **
victor.am@cenidet.tecnm.mx ***

Resumen

En este trabajo se describe el diseño y comparativa de dos esquemas de control diferentes, pertenecientes a la teoría de control clásica y moderna, que tienen como objetivo regular la velocidad angular en el rotor y la potencia generada de un aerogenerador. Se exponen algunos conocimientos teóricos tanto del control como del modelado del sistema que permiten comprender de manera clara el desarrollo y la aplicación de los esquemas de control seleccionados. El fin es presentar un análisis comparativo del desempeño de los controladores y mostrar las ventajas que pueda tener uno sobre el otro.

Palabras clave: Aerogenerador, Control multivariable, Modelado.

1. Introducción

En la actualidad, el sector de producción de energía eólica está experimentando un crecimiento en todo el mundo. Sin embargo, como en la mayoría de los procesos en la industria, los sistemas de generación de energías renovables, entre ellos los aerogeneradores, tienen múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Una de las principales características de este tipo de sistemas es que presentan fuertes interacciones entre sus variables y por lo tanto, las estructuras de control clásico no siempre son efectivas para tareas de regulación o seguimiento en los mismos, lo que representa una desventaja a tomar en cuenta de estas estructuras de control. Actualmente las metodologías de control para aerogeneradores se centran en técnicas de control clásicas llevadas a sistemas MIMO mediante estructuras desacopladas, como en (Yin y col., 2014). También se han propuesto otras metodologías que buscan mejorar el desempeño de los controladores cuando son importantes las interacciones entre variables, como ejemplo se cita el trabajo en (Herrera, 2016). Sin embargo, como alternativas, las metodologías de control moderno pueden ser efectivas para sintetizar controladores MIMO que sean viables para este sistema. En resumen, el trabajo de este articulo se enfoca en el control de la velocidad angular del rotor y la potencia producida de los aerogeneradores mediante técnicas de control multivariable, cuyas ventajas se identifican mediante un análisis comparativo.

2. Descripción del aerogenerador

El funcionamiento general del aerogenerador empieza con la fuerza del viento ejerciendo presión sobre las palas, lo que induce un movimiento giratorio en el rotor, es decir, transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. A su vez, esta energía es distribuida por una caja de transmisión hacia el eje del generador, transformando la energía mecánica en energía eléctrica que después es adecuada por el convertidor.

El aerogenerador considerado como sistema trabaja en 2 modos operacionales que dependen de la velocidad del viento (Odgaard y col., 2013). En la Fig. 1 se traza la curva de potencia relativa del aerogenerador, donde se muestra que para velocidades del viento entre 3-13$\frac{m}{s}$ se busca obtener una producción de energía óptima, lo cual se logra cuando el ángulo de inclinación de las palas $\beta = 0$ grados. En la curva de potencia, la referencia del torque ($T_{g,r}$) se mantiene en su valor óptimo mientras se conserva el máximo coeficiente de torque ($C_{q,max}$) y se calcula mediante

ISSN en trámite

$$T_{g,r} = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 C_{q,max}(\frac{w_g}{N_g})^2 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad en el aire, R es el radio de la hélice, N_g es la relación de transmisión, w_g es la velocidad angular en el eje del generador, y $C_{q,max} = 0.0648$ es el máximo valor del coeficiente de torque.

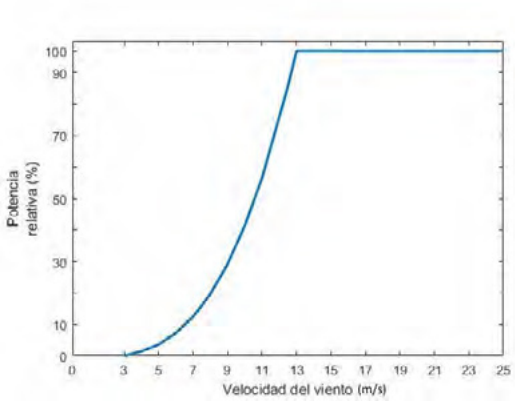


Figura 1: Curva de potencia relativa en función de la velocidad del viento

Cuando la velocidad del viento supera los 13 m/s se alcanza la referencia de potencia nominal y se conmuta al modo de operación 2. El objetivo del modo 2 es mantener las referencias de la velocidad angular del rotor y de la potencia. Estos objetivos se logran ajustando el ángulo de referencia β_r, de forma que disminuya el coeficiente de potencia del aerogenerador y regulando $T_{g,r}$ en el convertidor de forma que sea posible suprimir las perturbaciones rápidas.

2.1. Modelo del viento

El modelo de viento está reportado por Odgaard y col., 2013. Este modelo consta de cuatro partes: la velocidad medida del viento v_m; una predicción estocástica del comportamiento del viento v_s; la cizalladura del viento v_{ws}; y la velocidad del viento sobre la torre $v_{ts}(t)$. El modelo de viento combina estas partes y está dado por:

$$v_w = v_m + v_s + v_{ws} + v_{ts} \quad (2)$$

El viento medido es una secuencia de la velocidad del viento que varía lentamente. Es un conjunto de datos medidos experimentalmente con un filtro pasa bajas. La parte estocástica del modelo de viento está modelada por filtros de Kalman. La cizalladura del viento se obtiene mediante la ecuación (3)

$$v_{ws} = \frac{2\ v_m}{3\cdot R^2}\cdot\left(\frac{R^3\cdot\alpha}{3\cdot H}\cos\theta_i + \frac{R^4}{4}\cdot\alpha\cdot\frac{\alpha-1}{2\cdot H^2}\cdot\cos\theta_i^2\right) + \ldots \\ \frac{2v_m}{3\cdot R^2}\cdot\left(\frac{R^5}{5}\cdot\frac{(\alpha^2-\alpha)\cdot(\alpha-2)}{6\cdot H^3}\cdot\cos\theta_i^3\right) \quad (3)$$

donde, θ_i corresponde a la posición de las tres palas, α y H son parámetros constantes del modelo, datos en la Tabla 1. El viento sobre la torre se calcula a partir de

$$v_{\mathrm{ts}} = \frac{(1+\frac{\alpha\cdot(\alpha-1)\cdot r_0^2}{8\cdot H^2})\cdot\bar{\theta}_{\mathrm{r}}}{3\cdot r^2}\cdot[2\alpha^2\frac{R^2-r_0^2}{\left(R^2+r_0^2\right)\sin\left(\bar{\theta}_{\mathrm{r}}\right)^2+k^2)} + \ldots \\ 2\alpha^2k^2\frac{\left(r_0^2-R^2\right)\left(r_0^2\sin\left(\bar{\theta}_{\mathrm{r}}\right)^2+k^2\right)}{R^2\sin\left(\bar{\theta}_{\mathrm{r}}\right)^2+k^2}] \quad (4)$$

donde

$$\bar{\theta}_{\mathrm{r}} = \theta_{\mathrm{i}} + \frac{(i-1)\cdot 2\pi}{3} - \left(\frac{\theta_{\mathrm{i}} + \frac{(i-1)\cdot 2\pi}{3}}{2\pi}\right)\cdot 2\pi$$

y r_0 está dado en la Tabla 1. Para mas detalles del modelo consultar (Odgaard y col., 2013).

Tabla 1: Parámetros en el modelo del viento

Parámetro	Valor
H	81 m
r_0	1.5 m
α	0.1-

2.2. Modelo del aerogenerador

Este modelo de referencia caracteriza un aerogenerador de 4.8 MW, de velocidad variable y 3 palas, con acoplamiento de un convertidor. El modelo está formulado bajo la suposición de que la torre y las palas son rígidas y se considera un modelo aerodinámico estático.

El modelo matemático del aerogenerador es la integración de ecuaciones estáticas y dinámicas derivadas de leyes físicas y relaciones empíricas que rigen el comportamiento para cada una de las partes que componen este sistema. Las ecuaciones han sido reportadas en (Niss y col., 2009; Odgaard y col., 2013) y se describen a continuación.

A. Modelo aerodinámico

La aerodinámica del aerogenerador se representa mediante un par que actúa sobre las palas, para calcular la magnitud de dicho par se utiliza la ecuación (5)

$$T_r = \frac{\rho\ \pi\ R^3\ v_w^2\ C_q(\lambda,\beta)}{2} \quad (5)$$

donde v_w es la velocidad del viento, C_q es el coeficiente de torque, que es una función de (β) y la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento (λ) calculada a partir de la ecuación (6)

$$\lambda = \frac{R\cdot w_r}{v_w} \quad (6)$$

donde w_r es la velocidad angular en el eje del rotor. Los valores de C_q fueron obtenidos mediante datos experimentales, por lo tanto es una función dada en (7) que

ISSN en trámite

aproxima el mapeo de los datos $C_q\,(\beta,\lambda)$ reportados en (Odgaard y col., 2013).

$$C_q = -1{,}334e^{-5}\beta^2 - 1{,}2e^{-3}\ \beta\ \lambda + 1{,}0862e^{-4}\ \beta... \\ -(1{,}667e^{-4}\lambda)^2 - 4{,}149e^{-5}\lambda + 0{,}1042 \quad (7)$$

B. Modelo del tren de transmisión

El tren de transmisión se representa a través de un modelo de dos masas. El principal propósito del tren de transmisión es transferir T_r hacia el eje del generador. Además, integra una caja de engranajes que aumenta la velocidad de rotación desde el lado del rotor (Lado de baja velocidad) hacia el lado del generador (Lado de alta velocidad).

Lado de baja velocidad

$$\dot{w}_r = \frac{1}{J_r}(T_r - Kdt\ \theta\triangle - (Bdt + B_r)w_r + \frac{Bdt}{N_g}w_g) \quad (8)$$

J_r es la inercia en el eje del rotor, kdt es la fuerza de rigidez que se opone a la torsión, $\theta\Delta$ es el ángulo de torsión en la transmisión, Bdt es el coeficiente de amortiguamiento en la transmisión, Br es el coeficiente de fricción en el rotor, N_g corresponde a la relación de la transmisión, w_g es la velocidad angular en el eje del generador, y w_r está dada por la solución de (8).

Lado de Alta velocidad

$$\dot{w}_g = \frac{1}{J_g}(\frac{\eta dt Kdt}{N_g}\theta\triangle + \frac{\eta dt Bdt}{N_g}w_r - (\frac{\eta dt Bdt}{N_g^2} + B_g)w_g - T_g) \quad (9)$$

En este lado J_g es la inercia en el eje del generador, ηdt es la eficiencia de la transmisión, B_g es el coeficiente de fricción en el eje del generador y T_g es el torque del generador.

El ángulo de torsión en la transmisión se calcula a partir de (10).

$$\dot{\theta}\triangle = w_r - \frac{1}{N_g}w_g \quad (10)$$

C. Modelo del sistema de orientación

El sistema de orientación angular de las palas tiene el propósito de reducir o aumentar el valor del C_q, y su mecanismo es un actuador que se modela como un sistema de primer orden

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_r \quad (11)$$

donde β_r es el ángulo de referencia y τ es una constante de tiempo.

D. Modelo del generador y convertidor

Como parte del sistema del aerogenerador, la dinámica del convertidor y generador se puede modelar como un sistema de primer orden descrito por la ecuación (12)

$$\dot{T}_g = -\frac{1}{\tau_g}T_g + \frac{1}{\tau_g}T_{g,r} \quad (12)$$

donde $T_{g,r}$ es el torque de referencia y τ_g es una constante de tiempo. La potencia producida por el generador se obtiene mediante la ecuación (13), donde η_{gc} es la eficiencia del generador.

$$P_g = \eta_{gc}\ w_g\ T_g \quad (13)$$

2.3. Modelo linealizado del aerogenerador

El modelo linealizado del aerogenerador se obtiene mediante la expansión de Taylor de las ecuaciones (5)-(13) alrededor de un estado de equilibrio obtenido por las condiciones nominales del sistema, las cuales son $P_{g,nom} = 4{,}8MW$ y $w_{g,nom} = 162\frac{rad}{s}$. El vector de estado, la señal de control y la salida son:
$x = [w_r\ \ w_g\ \ \theta\Delta\ \ \beta\ \ T_g]^T = [x_1\ \ x_2\ \ x_3\ \ x_4\ \ x_5]^T$,
$u = [\beta_r\ \ T_{g,r}]^T = [u_1\ \ u_2]^T$;
$y = [w_r\ \ P_g]^T = [y_1\ \ y_2]^T$

En la Tabla 2, se muestra el punto de equilibrio obtenido a partir de las condiciones nominales conocidas del sistema.

Tabla 2: Punto de equilibrio del sistema

v_w	w_r	w_g	$\theta\Delta$	β	T_g	P_g
15.08 $\frac{m}{s}$	1.705 $\frac{rad}{s}$	162 $\frac{rad}{s}$	1.4×10^{-3} rad	6.755 deg	30234 Nm	4.8×10^{6} W

La descripción del espacio de estados del sistema linealizado alrededor del punto de equilibrio es:

$$\dot{x_d} = A\ x_d + B\ u_d \\ y_d = C\ x_d \quad (14)$$

donde $x_d = x - x^{eq}$; $u_d = u - u^{eq}$; $y_d = y - y^{eq}$. Además x^{eq}, u^{eq} y y^{eq} son los estados, las entradas y las salidas en el punto de equilibrio, respectivamente.

Los elementos de la matriz de estados A están dados por una matriz jacobiana de las ecuaciones (5) y (8)-(12):

$$a_{11} = \frac{\rho\cdot\pi\cdot R^3\cdot v_w^2 C_q(x_4)}{2J_r} - \frac{B_{dt}+B_r}{J_r}$$
$$a_{12} = \frac{B_{dt}}{N_g J_r} \quad a_{13} = -\frac{K_{dt}}{J_r} \quad a_{15} = 0$$
$$a_{14} = \frac{\rho\cdot\pi\cdot R^3\cdot v_w^2 C_q(x_1)}{2J_r}$$

ISSN en trámite

$$a_{21} = \frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g J_g} \quad a_{22} = -\frac{\left(\frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g^2} + B_g\right)}{J_g}$$

$$a_{23} = \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{N_g J_g} \quad a_{25} = -\frac{1}{J_g} \quad a_{24} = 0$$

$$a_{31} = 1 \quad a_{32} = -\frac{1}{N_g}$$

$$a_{33} = a_{34} = a_{35} = 0$$

$$a_{44} = -\frac{1}{\tau} \quad a_{55} = -\frac{1}{\tau_g}$$

$$a_{41} = a_{42} = a_{43} = a_{45} = 0$$
$$a_{51} = a_{52} = a_{53} = a_{54} = 0$$

Los elementos de la matriz B son

$$b_{41} = \frac{1}{\tau} \quad b_{52} = \frac{1}{\tau_g}$$

$$b_{11} = b_{12} = b_{21} = b_{22} = b_{31} = b_{32} = b_{42} = b_{51} = 0$$

La matriz C se compone de

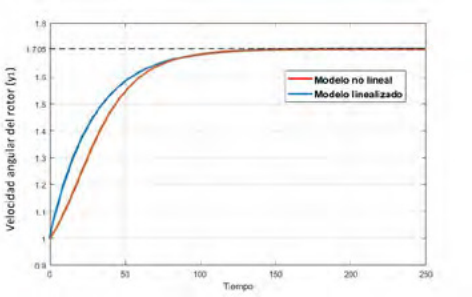
$$c_{11} = 1 \quad c_{22} = \eta_{gc} x_5 \quad c_{25} = \eta_{gc} x_2$$

$$c_{12} = c_{13} = c_{14} = c_{15} = c_{21} = c_{23} = c_{24} = 0$$

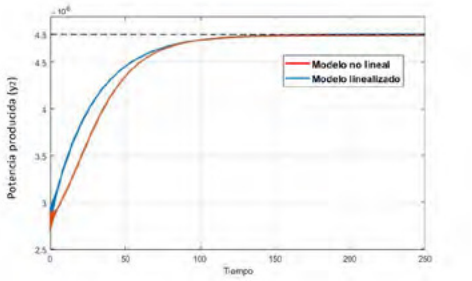
donde, los eigenvalores de la matriz A corresponden a los polos naturales del sistema $[-0{,}063 \quad -0{,}0567 + 28{,}163i \quad -0{,}05679 - 28{,}163i \quad -11{,}11 - 100]$.

El modelo linealizado se verifica comparándolo con el modelo no lineal en el ambiente de Matlab Simulink. Los resultados del modelo lineal y no lineal para las 2 salidas se muestran en la Fig. 2.

En las Tablas (3 y 4) se muestran los parámetros del aerogenerador y los límites para las señales de control.



(a) Velocidad del rotor



(b) Potencia

Figura 2: Respuestas de los modelos lineal y no lineal

Tabla 3: Parámetros en el modelo del aerogenerador

Parámetro	Valor
ρ	1.225 $\frac{kg}{m^3}$
R	57.5 m
J_r	$55e^6$ $kg\ m^2$
K_{dt}	$2.7e^9$ $\frac{Nm}{rad}$
B_{dt}	775.49 $\frac{Nms}{rad}$
B_r	7.11 $\frac{Nms}{rad}$
N_g	95 -
J_g	390 $kg\ m^2$
η_{dt}	0.97 -
B_g	45.6 $\frac{Nms}{rad}$
τ	$50ms$
τ_g	$10ms$
η_{gc}	0.98 -

Tabla 4: Valores limites para las señales de entradas

Variable	Valor min	Valor max
β_r	-2°	95°
$T_{g,r}$	0	32000 Nm

3. Diseño de control

El objetivo de control es mantener el valor de referencia de las dos variables de salida (Velocidad angular del ro-

ISSN en trámite

tor y Potencia producida), controlando las dos variables de entrada (Ángulo de referencia y torque de referencia) para mantener el modo de operación 2. En la Fig. 3 se muestra el diagrama del sistema de control.

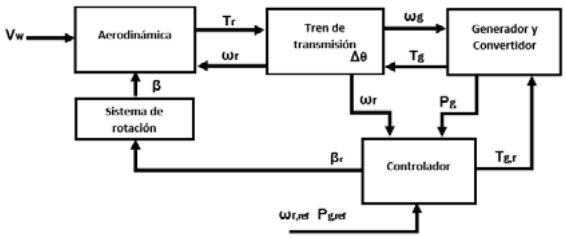


Figura 3: Diagrama del sistema con control

El objetivo es comparar dos metodologías de controladores para un sistema MIMO. En ambos casos, los controladores están diseñados para conseguir el error en estado estable nulo.

1) Controlador PID multi-lazo

2) Controlador Centralizado diseñado en espacio de estado por el método de reubicación de polos.

3.1. Control PID multi-lazo

Debido a que los controladores PID solo se aplican a sistemas SISO, la implementación de los PID en el sistema multivariable se logró con la definición de los lazos de control que se muestran en la Fig. 4. El ángulo de referencia (u_1) controla la velocidad angular del rotor (y_1), y el torque de referencia (u_2) controla la potencia producida (y_2).



Figura 4: Lazo cerrado del controlador multilazo

Para la sintonía de los parámetros de los controladores se utilizó el método de Cohen-Coon, a partir de la curva de reacción generada por el sistema en lazo abierto y un cambio en la entrada de tipo escalón con una variación del 15 % respecto al valor nominal de cada entrada (Azman y col., 2017). En la Fig. 5 se muestran las curvas de reacción obtenidas para y_1 y y_2. Mediante esta técnica, se obtienen los parámetros de las ecuaciones (15-17) en la curva de y_1, y de (18-20) en la curva de y_2, con estos parámetros y la tabla de sintonía de (Srinivas y col., 2014), se obtienen las ganancias de la Tabla 5.

$$k_{0,1} = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} = \frac{1{,}885 - 1{,}705}{5{,}7588 - 6{,}755} = -0{,}1742 \quad (15)$$

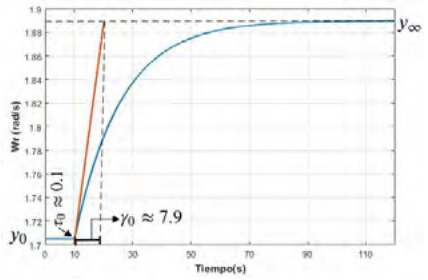
$$\tau_{0,1} = t_1 - t_0 = 10{,}1 - 10 = 0{,}1 \quad (16)$$

$$\gamma_{0,1} = t_2 - t_1 = 18 - 10{,}1 = 7{,}9 \quad (17)$$

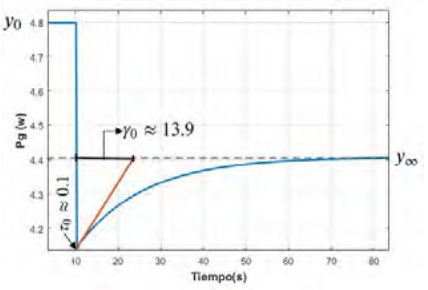
$$k_{0,2} = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} = \frac{4{,}418e^6 - 4{,}8e^6}{25699 - 30234} = 84{,}0862 \quad (18)$$

$$\tau_{0,2} = t_1 - t_0 = 10{,}1 - 10 = 0{,}1 \quad (19)$$

$$\gamma_{0,2} = t_2 - t_1 = 24 - 10{,}1 = 13{,}9 \quad (20)$$



(a) Respuesta en lazo abierto de y_1 para una cambio tipo escalón en u_1



(b) Respuesta en lazo abierto de y_2 para una cambio tipo escalón en u_2

Figura 5: Respuestas de los modelos lineal y no lineal

Tabla 5: Ganancias de los controladores PID a partir de la tabla de sintonía

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID_1	-606.1070	0.2448	0.0363
PID_2	2.2071	0.2454	0.0363

Variando los valores de las ganancias de la Tabla 5 de forma empirica se obtiene las ganancias de la Tabla 6. Con estas ganancias se obtiene un mejor desempeño ante un cambio en la velocidad del viento del 10 % para ambas salidas.

ISSN en trámite

Tabla 6: Ganancias de los controladores PID

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID_1	-596.076	0.02448	0.037
PID_2	0.22071	0.02454	0.263

3.2. Control MIMO por retroalimentación de estados

Partiendo del modelo en su representación en espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{21}$$

se aplicó el diseño de este controlador por retroalimentación de estados con acción integral con base en la teoría descrita en (Rosinová y col., 2016; Zhang y col., 2015). En la Fig. 6 se presenta el diagrama de este controlador. La introducción de la parte integral en el sistema añade 2 nuevos estados pertenecientes a las integrales de los 2 errores, por lo tanto, se construye un nuevo sistema aumentado de la forma expresada en (22).

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \begin{bmatrix} A & 0_{5\times 2} \\ -C & 0_{2\times 2} \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} B \\ 0_{2\times 2} \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} C & 0_{2\times 2} \end{bmatrix} \bar{x} \end{aligned} \tag{22}$$

donde $\bar{x} = [x \;\; x_i]^T$, los estados x_i son introducidos por los integradores. El controlador que resulta se divide en una parte proporcional (K_p, ganancia de retroalimentación) y una parte integral(K_i, ganancia de integración).

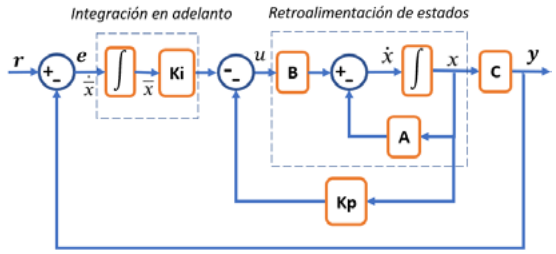


Figura 6: Lazo cerrado del controlador de retroalimentación de estados con integrador

La ley de control está dada por la ecuación (23).

$$u = -K_p\, x - K_i\, \bar{x} \tag{23}$$

Se probaron configuraciones de polos de forma heurística y se obtuvo que para obtener un pico menor al 1 % y un tiempo de establecimiento aproximado de 2 s ante un cambio en la velocidad del viento del 10 % para ambas salidas, los polos deseados se colocan en $P = \begin{bmatrix} -8 & -8 & -11 & -12 & -11 & -22 & -200 \end{bmatrix}$. Haciendo uso de la función "place" de Matlab obtenemos $K = [K_p \;\; K_i]$.

Por lo tanto, las matrices de ganancias obtenidas del controlador son

$$K_p = \begin{bmatrix} -8{,}2342 \times 10^4 & 686{,}9845 & -3{,}341 \times 10^4 & 21{,}7983 & -0{,}0327 \\ 180{,}3832 & 34{,}3298 & 1{,}3886 \times 10^5 & 0{,}0115 & -0{,}8149 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 4{,}7261 \times 10^4 & 9{,}7574 \times 10^4 \\ -292{,}9135 & -0{,}0056 \end{bmatrix}$$

4. Resultados

Para analizar el desempeño de los controladores en un escenario de operación realista con variaciones rápidas en la velocidad del viento se realizó la simulación de ambos esquemas de control aplicado al modelo no lineal del sistema y teniendo como entrada, un mismo perfil de viento generado a través de la simulación de su modelo, el cual se muestra en la Fig. 7.

Simulando los dos modos de operación del aerogenerador, la conmutación entre estos se hizo calculando el promedio de la velocidad del viento en cada instante de tiempo del perfil. Con este procedimiento se evitaron conmutaciones abruptas. La conmutación al modo 2 en donde se implementaron los controladores para este perfil de viento ocurre en el segundo 22500 aproximadamente.

En la Fig. 8 se observa como el controlador multi-lazo es menos eficiente en para mantener la referencia , debido a la interacción de variables afecta en mayor medida a la salida 1.

En la Fig. 9 se observa la efectividad de ambos controladores en mantener la salida sobre la referencia, sin embargo, se puede notar que el control multi-lazo presenta valores pico mas grandes.

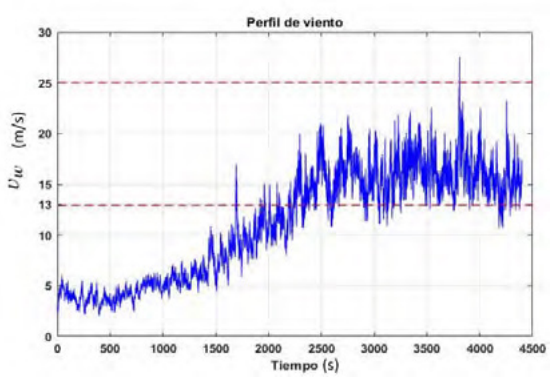


Figura 7: Perfil de viento

ISSN en trámite

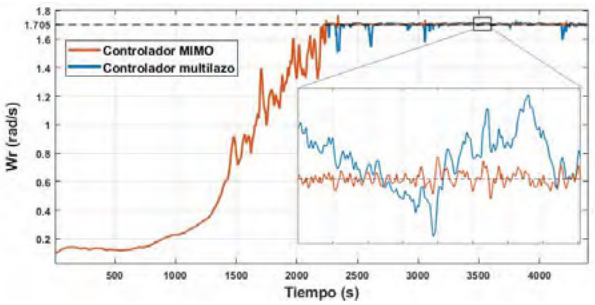


Figura 8: Velocidad angular del rotor. Respuesta en lazo cerrado del controlador de retroalimentación de estados con integrador.

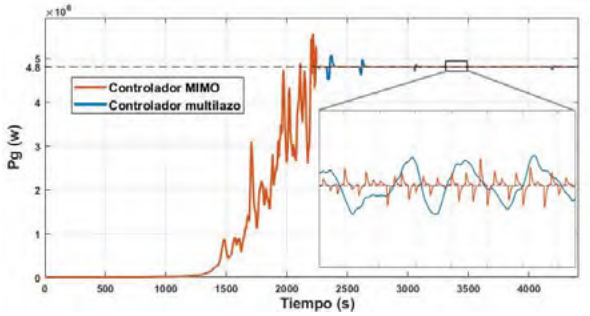


Figura 9: Potencia del generador. Respuesta en lazo cerrado del controlador de retroalimentación de estados con integrador.

En las Fig. 10 se presenta la comparativa de las leyes de control u_1 que presentaron los controladores al conmutarse el modo de operación 2. En esta comparación es posible observar que los ambos controladores presentan valores en rangos similares dentro de los limites para esta variable de control.

En la Fig. 11 se presenta la comparativa de las leyes de control u_2 que presentaron los controladores al conmutarse el modo de operación 2. En esta comparación es posible destacar que el Controlador PID presenta mayores variaciones para esta variable de control y en algunos instantes de tiempo logra rebasar el valor limite para esta variable.

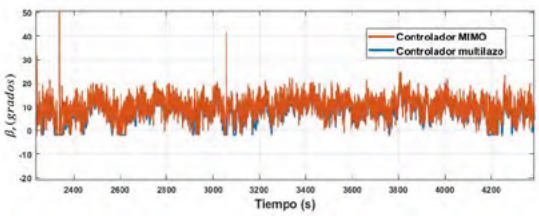


Figura 10: Valores de la entrada u_1 a partir del seg. 2250

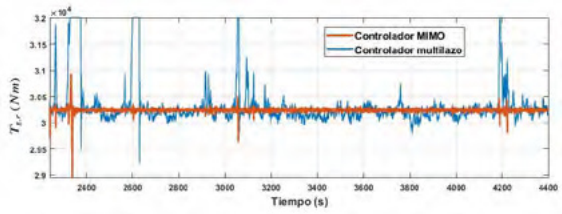


Figura 11: Valores de la entrada u_2 a partir del seg. 2250

5. Conclusiones

Se diseñó un control PID multi-lazo con el método de sintonización de Cohen-Coon para la obtención de sus ganancias. Posteriormente se diseñó un controlador por retroalimentación de estados con acción integral y se utilizó el método de reubicación de polos para obtención de sus ganancias. en los resultados obtenidos hemos podido validar que dada la naturaleza de los sistemas multivariables, los controladores centralizados pueden obtener mejores resultados que los controladores multi-lazo, ya que son controladores completamente multivariables y por lo tanto las interacciones entre variables no afectan su desempeño.

Referencias

Azman, A. A., Rahiman, M. H. F., Mohammad, N. N. & Marzaki, M. H. (2017). Modeling and comparative study of PID Ziegler Nichols (ZN) and Cohen-Coon (CC) tuning method for multi-tube aluminum sulphate water filter (MTAS). *IEEE 2nd international conference on automatic control and intelligent systems (I2CACIS)*, 25-30. https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2017.8239027

Herrera, S. F. (2016). Diseño de sistemas de control multivariable mediante redes de desacoplo: aplicación al control de aerogeneradores. *Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba*.

Niss, M. O. K., Esbensen, T., Sloth, C., Stoustrup, J. & Odgaard, P. F. (2009). A Youla-Kucera approach to gain-scheduling with application to wind turbine control. *IEEE Control Applications(CCA) and Intelligent Control(ISIC)*, 1489-1494. https://doi.org/10.1109/CCA.2009.5281172

Odgaard, P. F., Stoustrup, J. & Kinnaert, M. (2013). Fault-Tolerant Control of Wind Turbines: A Benchmark Model. *IEEE Transactions on control systems Technology, 21*(4), 1168-1182. https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2259235

Rosinová, D., Balko, P. & Puleva, T. (2016). Teaching multiloop control of nonlinear system: three tanks case study. *IFAC-PapersOnLine*, 360-365. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.204

ISSN en trámite

Srinivas, P., Lakshmi, K. V. & Kumar, V. N. (2014). A comparison of PID controller tuning methods for three tank level process. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 6810-6820.

Yin, X.-x., Lina, Y.-g., Li, W. & Gu, Y.-j. (2014). Integrated pitch control for wind turbine based on a novel pitch control system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *6*, 043106. https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4890566

Zhang, S., Zhang, S. & Zhang, G. (2015). Design of Tracking Control System by Closed-Loop Pole Placement. *In 2015 3rd International Conference on Mechatronics and Industrial Informatics (ICMII 2015)*, 79-84. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.204

ISSN en trámite

Análisis del tiempo muerto en la tensión de salida en el convertidor multinivel en cascada.

Ing. Mayra Rocio Valencia Brito*. Dr. Jesús Aguayo Alquicira*

**Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET (m20ce080@cenidet.tecnm.mx, jesus.aa@cenidet.tecnm.mx).*

Resumen: Este artículo muestra un análisis del tiempo muerto en el convertidor multinivel en cascada en donde se analizan parámetros de interés como son, tensión a la salida y la THD *(Total Harmonic Distortion)*.

Este análisis se centra en conocer su comportamiento cuando el tiempo muerto es mayor o menor a lo establecido, en las hojas de especificaciones *(datasheet)* para desarrollar este análisis se utiliza la técnica de modulación SHE (*Selective Harmonic Elimination*), para realizar la *SHE* es indispensable tener una manera de solucionar las ecuaciones que nos arroja esta técnica, debido a que son ecuaciones transcendentales, por este motivo se utiliza software *MATLAB* para la solución de las ecuaciones, para la elaboración de la simulación del convertidor multinivel en cascada se utiliza el software *Pspice*.

Palabras clave: Convertidor multinivel en cascada, Tiempo muerto, IGBT´s, Conversión de energía.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la conversión de energía eléctrica es de vital importancia, debido a la existencia de una gran variedad de cargas. En electrónica de potencia los principales tipos de conversión de energía eléctrica son los siguientes: CA-CA (corriente alterna a corriente alterna), CD-CD (corriente directa a corriente directa), CA-CD (corriente alterna a corriente directa) y CD-CA (corriente directa a corriente alterna), este artículo se centra primordialmente en la conversión de CD-CA estos son llamados también como inversores, los cuales son encargados de producir una tensión alterna controlada en su salida a partir de una tensión CD.

Hoy en día científicos a nivel mundial ponen gran esfuerzo en mejorar la apariencia de los inversores multinivel refiere (Bárcenas, 2002).

Es importante mencionar que existen tres convertidores multinivel, llamados también como convertidores multinivel clásicos los cuales se mencionan a continuación:

- Diodos enclavados
- Condensadores flotantes
- En cascada

Los convertidores multinivel, están integrados principalmente por dispositivos de conmutación, estos requieres de un tiempo a ese tiempo se le denomina tiempo muerto. El tiempo muerto es necesario debido a que los interruptores reales no se pueden apagar inmediatamente cuando la señal de salida del interruptor esta apagada, por lo tanto cuando dos interruptores se encuentran en una misma rama es necesario un tiempo muerto que permita el apagado de uno de los interruptores antes de encender el otro con el fin de evitar una conducción simultanea y por lo tanto un corto circuito a este lapso de tiempo se le denomina “tiempo muerto” a su vez el tiempo muerto proporciona una zona de seguridad, pero también afecta la forma de tensión de salida al modificarse (Cárdenas G. y Horta M. 1994).

2. CONVERTIDOR CD-CA

La función de estos es cambiar una tensión simétrica de salida alterna, con la magnitud y frecuencia requeridas (Santana, 2009).

Los convertidores CD-CA, son utilizados como *motor drives* (un amplificador de corriente cuya función es tomar una pequeña señal de control de baja corriente y convertirla en una señal de alta corriente para alimentar el motor).

En la Tabla I, se muestra un estudio comparativo en donde se muestran las ventajas y desventajas de cada uno de los convertidores multinivel.

Tabla I. Ventajas y desventajas de los convertidores multinivel clásicos.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
DIODO ENCLAVADO	La tensión de bloqueo de los interruptores es la tensión de una capacidad de entrada.	En topologías de más de tres niveles, los diodos de fijación requieren bloquear diferente

ISSN en trámite

	El número de capacidades requerida es pequeño en comparación con otras topologías multinivel. Este punto es especialmente interesante dado que solo los componentes reactivos los que suponen un mayor coste en el convertidor se pueden conectar directamente a un bus de continua, sin necesidad de crear otros buses adicionales. No requiere transformadores. Cambio de un estado a otro accionando un solo interruptor (Reyes et al., 2020).	tensión, en función de su posición en el convertidor, siendo la tensión máxima de bloqueo Vpn(n-2)/(n-1), haciendo necesaria la Asociación serie de Dios o el uso de diodos de mayor tensión [Lin y Weiss, 2017]. *Complicación de la estructura, que no ha sido cuidadosamente desarrollada incluso en lugar de que todo lo necesario aspectos para su ejecución práctica en la industria de alta potencia (Reyes et al., 2020).
CONDENSADORES FLOTANTES	No hay diodos de fijación en el convertidor, eliminando la problemática asociada a estos diodos. El control de la tensión de las capacidades flotantes se realiza mediante el uso apropiado de los estados redundantes del convertidor. Algunas transiciones entre estados obligan a conmutar más de un interruptor a la vez, incluso hasta cuatro conmutaciones y es preferible evitarlas siempre y cuando el equilibrado de las tensiones de las capacidades lo permita. El equilibrio de las capacidades flotantes puede ser abordado de forma independiente para cada rama del convertidor, mientras que en el convertidor diodo enclavada debe considerarse para el sistema trifásico completo (Ruderman et al., 2008).	Emplea un número elevado de capacidades. La corriente que circula a través de todas las capacidades flotantes es la misma, por lo tanto, los condensadores deberían tener el mismo valor capacitivo para mantener valores similares de tensión de rizado. Las capacidades flotantes deben soportar la corriente de carga, por lo tanto, deben seleccionar se adecuadamente, con objetivo de no generar excesivas perdidas y para no condicionar la corriente máxima del convertidor (Deepa et al., 2017).
EN CASCADA PUENTE H	Al estar constituidos por asociación de etapas en puente, la construcción puede ser modular, rebajando complejidad del montaje y costes. Requiere menor número de componentes que otras topologías multinivel para alcanzar el mismo número de niveles. No necesitan diodos de fijación o capacidades flotantes. La topología es tolerante a fallos, puesto que el convertidor puede continuar funcionando con aun menor nivel de tensión, aunque una de sus etapas este cortocircuito. Los convertidores de corriente directa a corriente alternan son utilizados como drives de motores y como fuentes de corriente alterna sinusoidal interrumpida y tiene como objetivo producir una seña de corriente sinusoidal, cuya magnitud y frecuencias.	Si bien se pueden cancelar determinados armónicos del lado de la red mediante la elección apropiada de los grupos horarios de los secundarios los transformadores con múltiples secundarios aislados presentan inconvenientes que impiden su más amplia implantación. Las características del transformador hacen que el coste del convertidor se incremente de forma notable (Lin y Wess, 2017).

Una vez que se tiene las ventajas y desventajas de los convertidores multinivel se llega a las conclusiones de elegir la topología, para este estudio de tiempo muerto se selecciona el convertidor multinivel en cascada debido a a sus siguientes características.

- Tiene menor cantidad de dispositivos electrónicos.
- No presenta altos costos.
- Es una configuración conectada en serie.
- Tiene la ventaja de ampliarse.

El análisis de tiempo muerto en esto dispositivos es un asunto relevante, el tiempo muerto como anteriormente se ha mencionado tiene una conexión con el tiempo de vida útil de un convertidor, es decir la funcionalidad de los interruptores que se seleccionan, para seleccionar el tipo de interruptor que se utilizará también ha sido necesario tener las características de cada uno de los interruptores seleccionados, MOSFET e IGBT.

MOSFET *(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor)* por sus siglas en inglés: Se describe como un dispositivo controlado por voltaje, porque su corriente de salida varía en función de un pequeño voltaje aplicado a su puerta. Funcionalmente, lo que está sucediendo es que el campo electrostático de la puerta está afectando al igual la resistencia del canal de fuente a drenaje (Rashid, 2004). “Transistor de efecto de campo”

IGBT *(Insulated Gate Bipolar Transistor)* por sus siglas en inglés: Puede considerarse un dispositivo controlador de voltaje ya que su corriente de salida también es función de un pequeño voltaje aplicado a su puerta.
Defiere funcionalmente en que este voltaje de señal de control módulos una resistencia de canal que a su vez también varia el número de portadores de corriente tanto electrones como agujeros, disponibles disponible para transportar corriente desde el terminal de emisor al terminar colector (Rashid, 2004).

En vista de la información obtenida se deduce que el transistor que más conviene para este análisis es el *IGBT*, debido a que es un cruce es decir un hibrido entre los transistores *MOSFET* y los *BJT* o bipolares que aprovecha los beneficios de ambas tecnologías. El *IGBT*, tiene la salida de conmutación y de conducción con las características de los transistores bipolares, pero es controlado por tensión como un *MOSFET*.

Una característica muy importante del *IGBT* es en el tiempo de apagado, este tiene un tiempo más largo que el *MOSFET*.

3. TIEMPO MUERTO EN EL CONVERTIDOR MULTINIVEL EN CASCADA

El tiempo muerto se utiliza ampliamente para evitar cortos circuitos entre los lados positivos y negativos debido a que los dispositivos de potencia tienen características de un tiempo de retardo de encendido y otro tiempo de retardo de apagado durante la conmutación. A lo largo los tiempos muertos, las tensiones de la fase de salida están determinadas por las polaridades de las corrientes de salida (Shimmyo et al., 2016). Por lo tanto, en la Figura 1, se muestra que si $S_1 – S_4$ los cuales serán interruptor uno y cuatro se apaga al instante del t_0, entonces S_2 -S_3 que serán interruptor dos y tres no se puede encender inmediatamente en el t_0, esto como se mencionaba anteriormente es porque se puede producir un corto circuito (Li et al., 2011). Entonces cuando S_1 esta encendido S_4 también se encenderá, S_2 se encenderá con el interruptor S_3.

ISSN en trámite

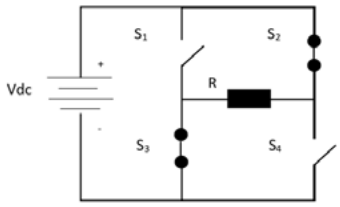
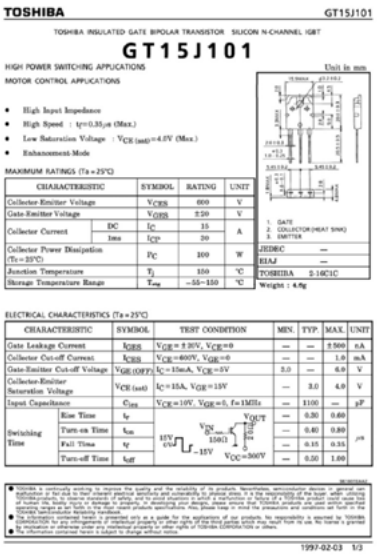


Figura 1. Formas de encendido de los interruptores S_1, S_2, S_3 y S_4 formando un puente H completo.

En concreto, cuando dos interruptores se hallan en una misma rama, es indispensable dejar pasar un tiempo que permita el apagado de uno de los interruptores antes de encender el otro, para que se evite una conducción simultanea y por ende un corto circuito. Este tiempo es nombrado como "tiempo muerto" (Cárdenas Galindo y Horta Mejía, 1994). Por lo tanto, el tiempo muerto es en realidad el tiempo de retardo en la señal de encendido de los interruptores S_1 y S_2 en un medio puente, si hablamos de un puente completo sería el tiempo de retardo en el encendido de los interruptores S_1 S_4 y S_2 S_3 (Li et al., 2011).
Un tiempo muerto (*Td*), no puede ser mayor al período que se tenga, el rango de tiempo muerto de los interruptores seleccionados se puede observar en la hoja de datos de los transistores a utilizar. En este caso se utilizó el *IGBT* GT15J101


TOSHIBA GT15J101

TOSHIBA INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR SILICON N-CHANNEL IGBT

GT15J101

HIGH POWER SWITCHING APPLICATIONS
MOTOR CONTROL APPLICATIONS

- High Input Impedance
- High Speed : t_f=0.3μs (Max.)
- Low Saturation Voltage : $V_{CE\ (sat)}$=4.0V (Max.)
- Enhancement Mode

Unit in mm

MAXIMUM RATINGS (Ta = 25°C)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Emitter Voltage		V_{CES}	600	V
Gate-Emitter Voltage		V_{GES}	±20	V
Collector Current	DC	I_C	15	A
	1ms	I_{CP}	30	
Collector Power Dissipation (Tc = 25°C)		P_C	100	W
Junction Temperature		T_j	150	°C
Storage Temperature Range		T_{stg}	−55~150	°C

JEDEC —
EIAJ —
TOSHIBA 2-16C1C
Weight : 4.6g

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = 25°C)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Gate Leakage Current		I_{GES}	V_{GE} = ±20V, V_{CE} = 0	—	—	±500	nA
Collector Cut-off Current		I_{CES}	V_{CE} = 600V, V_{GE} = 0	—	—	1.0	mA
Gate-Emitter Cut-off Voltage		$V_{GE\ (OFF)}$	I_C = 10mA, V_{CE} = 5V	3.0	—	6.0	V
Collector-Emitter Saturation Voltage		$V_{CE\ (sat)}$	I_C = 15A, V_{GE} = 15V	—	3.0	4.0	V
Input Capacitance		C_{ies}	V_{CE} = 10V, V_{GE} = 0, f = 1MHz	—	1100	—	pF
Switching Time	Rise Time	t_r	V_{IN} 0 — 15V, 15Ω, V_{OUT}, 1mH, 4.7Ω, V_{CC} = 300V	—	0.30	0.60	μs
	Turn-on Time	t_{on}		—	0.40	0.80	
	Fall Time	t_f		—	0.15	0.35	
	Turn-off Time	t_{off}		—	0.30	1.00	

1997-02-03 1/3

Figura 2. Hoja de datos del IGBT GT15J101

A continuación, se muestra la tabla II de conmutación del inversor multinivel de 5 niveles a la salida, en este caso por ser dos puentes H, el número de interruptores es de ocho.

Tabla II. Conmutación de los ocho interruptores.

Int.	0	V	2V	V	0	-V	-2V	-V
S_1	1	1	1	1	1	0	0	0
S_2	1	0	0	0	1	1	1	1
S_3	0	0	0	0	0	1	1	1
S_4	0	1	1	1	0	0	0	0
S_5	1	1	1	1	1	0	0	1
S_6	1	1	0	1	1	1	1	1
S_7	0	0	0	0	0	1	1	0
S_8	0	0	1	0	0	0	0	0

El *IGBT* que se ha seleccionado es el GT15J101 trabajando así con una frecuencia fundamental de 60 Hertz, esta frecuencia es la utilizada en México si residiéramos en España la frecuencia fundamental sería de 50 Hertz. A continuación, se muestra la Figura 3, donde se muestra el esquema del multinivel en el software seleccionado. En la Figura 4. Se observa la forma de la salida del inversor multinivel en cascada.

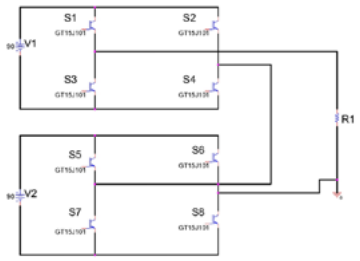


Figura 3. Esquema del inversor multinivel en cascada con IGBT´s

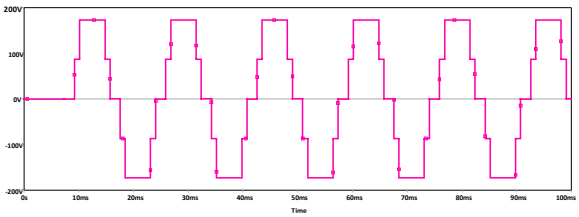


Figura 4. Señal a la salida del inversor multinivel en cascada

Para continuar con el análisis de tiempo muerto se desea conocer que técnica de modulación es la óptima para trabajar con salidas de tipo escalera en este caso se seleccionó las dos técnicas que son las más importantes en este ámbito las cuales son, *SHE* (*Selective Harmonic Elimination)* y *SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)* una de ellas trabaja con bajas frecuencias y

ISSN en trámite

la otra con altas frecuencias, a continuación, se explica a la brevedad, las ventajas de cada una de estas técnicas de modulación.

En la técnica *SHE*, la eliminación de armónicos es selectiva ya que se eliminan armónicos de bajo orden de una forma de onda que puede ser de tensión o corriente. Una de las principales características de esta técnica es que los armónicos de orden inferior serán reducidos por los armónicos dominantes (Villalón y Salas, 2017). Esta técnica trabaja a muy baja frecuencia con esto se puede reducir pérdidas de conmutación y tener una amplitud que se adapte a la componente fundamental (Ravi et al., 2015). Esta técnica consiente tener una simetría de cuarto de onda, es decir que es preciso encontrar los ángulos de disparo que se encuentran en el primer cuarto de onda, los siguientes ángulos se encuentran sumándole o restándole el cuarto de onda, se requiere recordar que $\frac{1}{4}$ de onda equivale a tener $\pi = 90°$ media onda que equivaldría al doble es decir 180° esto debido a el ángulo que se desea encontrar (López et al., 2015). Es importante mencionar que se inicia un análisis de las series de Fourier es decir de la forma de salida del inversor multinivel (Portilla,2017).

La técnica *SPWM* se centra en la comparación de una relación sinusoidal con señales portadoras, esta técnica es utilizada en altas frecuencias de conmutación (Chauca et al.,2014).

Como se mencionó anteriormente esta es una técnica muy popular para los disparos de los transistores en los inversores multinivel, tiene características de cambiar la amplitud de la tensión a la salida. Es importante recordar que la señal moduladora será la sinusoidal comparando con la portadora que es la triangular (Antúnez, 2012). Una vez teniendo estas comparaciones, se selecciona la técnica de modulación a ocupar, debido a que se maneja una baja frecuencia se trabajara con la *SHE* (*Selective Harmonic Elimination)* esta técnica nos da como resultado una familia de ecuaciones transcendentales la cuales no se pueden resolver de manera tan sutil a lápiz, es indispensable manejar un software matemático para la solución de las mismas, se realizó un programa de solución en el software *MATLAB*, para la solución de las ecuaciones, se realizaron cuatro métodos de solución los cuales son los siguientes, el Newton-Raphson, cuadrático, global y el genético, una vez que se elaboraron se notó mejor efectividad en el método *N-R,* es por ello que se seleccionó.

Se elige el índice de modulación en la Tabla III se observa el índice, el número de puente H y los ángulos.

Tabla III. Índice de modulación recordando que m<1, junto con los ángulos calculado

m<1	s	Ángulo 1	Ángulo 2
0.1	2	32.21°	90°
0.2	2	27.83°	90°
0.3	2	28.74°	90°
0.4	2	29.69°	89.99°
0.5	2	24.73°	84.73°
0.6	2	16.14°	76.14°
0.7	2	6.07°	66.07°
0.8	2	7.48°	52.51°
0.9	2	29.58°	29.90°
1.0	2	29.58°	29.59°

Una vez que se tiene el cálculo de los ángulos de un rango de [0.1-1.0] se puede observar la Tabla III donde muestra los niveles de conmutación con el número de ángulos de conmutación.

Una vez que se tiene toda la estructura del sistema se comienza a trabajar con el análisis del tiempo muerto respetando los valores que se encuentran en la hoja de datos del IGBT que se seleccionó.

4. RESULTADOS

Para comenzar con el análisis de tiempo muerto es importante considerar el rango con el que se trabajara, ese rango se ha mencionado con anterioridad, en esta ocasión se seleccionó el *IGBT*, la hoja de datos que se ocupara es
la del modelo "GT15J101" de la marca TOSHIBA, el interruptor tiene las siguientes características: Es un *IGBT TOSHIBA* con puerta aislada, transistor bipolar con Si (Silicio), un canal N IGBT, es utilizado para aplicaciones de conmutación de alta potencia, un ejemplo de estas aplicaciones es en motores, tiene una alta impedancia de entrada, alta velocidad, voltaje de baja saturación y modo de mejora, cuenta con una tensión de colector-emisor de 600V, una tensión de puerta-emisor de +20V y -20V, un peso de 4.6g, los rangos que manifiesta en tiempo muerto son los siguientes [sin mínimo-600ns] con un valor *TYP* (valor típico) de 300ns. Dadas las características mencionadas de este interruptor se continua con la realización de pruebas.
Las pruebas realizadas abarcaran dos parámetros los cuales son: *THD* y tensión a la salida.
A continuación, se muestran las gráficas de los datos recaudados para tener una mayor visión de lo elaborado.

ISSN en trámite

En la Figura 5. Se muestra el efecto del tiempo muerto en el voltaje de salida, en el tiempo muerto de 135ns se muestra un voltaje de salida de 144.478 V, el voltaje cae de forma considerable, en el tiempo muerto de 160ns el voltaje de salida vuelve a subir a 144.810V, en el tiempo muerto de 185ns cae el voltaje a 144.851V, en el tiempo muerto de 260ns cae el voltaje a 144.766V, el tiempo muerto de 360ns cae a 144.516V. Como se puede observar la variación que se muestra es de una centésima es decir la variación es por centésimas.

En la Figura 6. Se observa los valores de la tensión a la salida del inversor multinivel en donde se muestra que el valor de 144.745 V en el tiempo muerto de 85ns se muestra que están en tendencia como lo es también el valor de 144.766V en el tiempo muerto de 285ns y 310 ns, 144.807V en el tiempo muerto de 385ns.

En la Figura 7. Se muestra de manera mas puntual el tiempo muerto con variación de 10 ns es decir que es de [5ns a 110ns], por lo cual se observa la variación del voltaje a la salida de la siguiente manera de [144.749V a 144.81V].

En la Figura 8. Se observa la siguiente variación del tiempo muerto que oscila de [135ns-360ns] lo cual muestra de una manera as puntual de lo que sucede en este rango de tiempo muerto en el voltaje de salida, como se puede observar la variación va de [144.766V a 144.81V] como se observa del valor mínimo al máximo en este rango se puede decir que la variación es por decimas.

En la Figura 9. Se centra específicamente en el rango de tiempo muerto de [385ns-600ns], en donde el voltaje a la salida va variando como valor mínimo de 144.763V y el valor máximo de 144.853V.

En la Figura 10. Se observa que en el rango de tiempo muerto de [600ns-90ns] la variación es de 144.761V a 144.850V la variación es por centésimas.



Figura 5. Gráfica que muestra en su totalidad el análisis de tiempo muerto con un rango de [5ns-900ns]



Figura 6. Gráfica que muestra los valores de la tensión a la salida

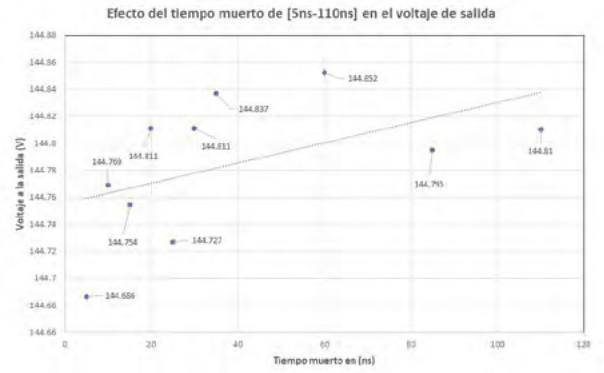


Figura 7. Gráfica que muestra la variación de la tensión de salida dada en Voltios en un rango de tiempo muerto de [5ns-110ns]

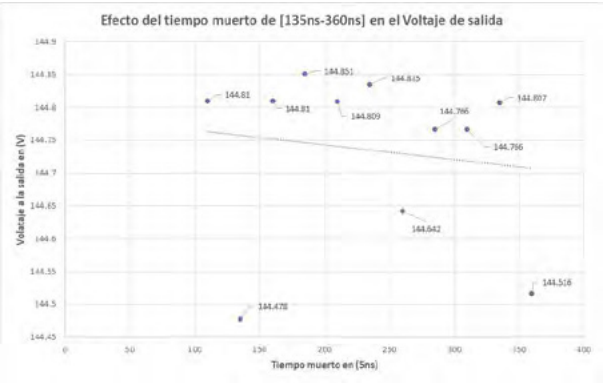


Figura 8. Gráfica que muestra la variación de la tensión de salida dada en Voltios en un rango de tiempo muerto de [135ns-360ns]

ISSN en trámite

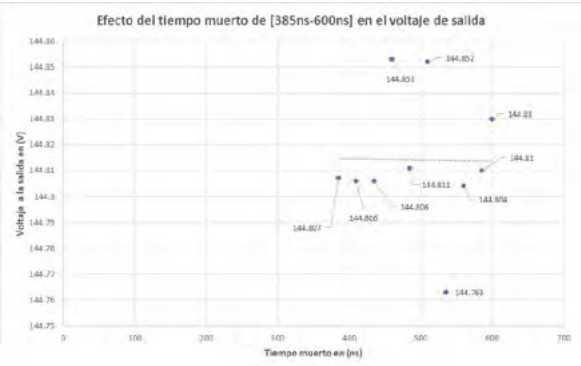


Figura 9. Gráfica que muestra lavariación de la tensión de salida dada en Voltios en un rango de tiempomuerto de [385ns-600ns]

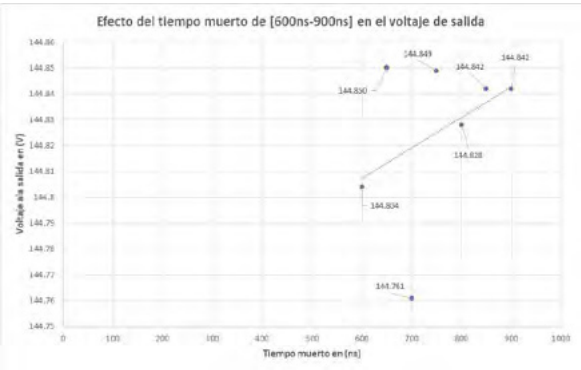


Figura 10. Gráfica que muestra la variación de la tensión de salida dada en Voltios en un rango de tiempo muerto de [600ns-900ns]

En la Figura 11. Se observa el efecto del tiempo muerto en la THD de la señal a la salida, en un rango de [5ns-900ns], se muestra una *THD* del 30% para cada uno de los tiempos muertos identificados en esta sección, es importante mencionar que ya se aplicó la *SHE*. Es decir que en este rango de tiempos muertos la variación de la *THD* se mantiene, mas sin embargo es importante mencionar que a mayor tiempo muerto la *THD* aumenta considerablemente.

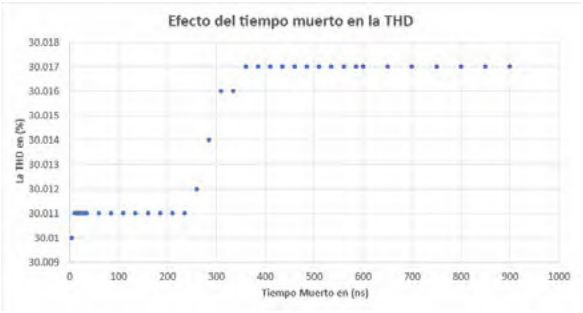


Figura 11. Efecto del tiempo muerto en la *THD* multinivel en cascada, con tiempo muerto dado en ns

5. CONCLUSIONES

Para continuar con las conclusiones, es importante mencionar que entre el rango de tiempo muerto que es de [5ns-900ns] se divide en tres partes importantes que es el tiempo muerto menor, el tiempo muerto medio y el tiempo muerto mayor, el rango de tiempo muerto menor lo compone los siguientes tiempos [5ns-160ns] en este rango se concluye que la variación de la tensión a la salida tiene una variación de tres decimas, con setenta y cuatro centésimas los valores de la tensión o voltaje son de [144.478V-144.852V].

En el segundo rango de tiempo muerto que seria el tiempo medio es de [185ns-480ns] la variación que presenta la tensión a la salida es de tres decimas con treinta y siete centésimas a diferencia del primer rango que es de tres decimas con setenta y cuatro centésimas, los valores de la tensión o voltaje a la salida es de [144.516V-144.853V].

En el tercer rango de tiempo muerto que será nombrado como el tiempo muerto mayor es de [485ns-900ns] en esta circunstancia la variación de la tensión de salida es de noventa y un centésimas, los valores de la tensión o voltaje a la salida es de [144.761V-144.852V].

Como se muestra a mayor tiempo muerto inyectado la variación a la salida va a ser menor, cuando se muestra un tiempo muerto medio la variación es mayor, lo mismo sucede cuando el tiempo muerto es menor la variación es mayor.

La variación existe y a genera el tiempo de rango que se le de al tiempo muerto, en este caso se utilizó la hoja de datos del interruptor que se selecciono por sus características.

En la *THD (Total Harmonic Distortion)* se muestra los resultados que la THD esta de manera continua sin mostrar alguna variación, debido a que se ha implementado la técnica de modulación *SHE (Selective Harmonic Elimination)* mas sin embargo cuando se coloca un tiempo muerto mayor a 950ns la *THD* comienza a crecer y por ende se generan mas armónicos en la tensión de salida.

ISSN en trámite

Es importante conocer el efecto del tiempo muerto en los inversores multinivel, considerando que el ya mencionado es de vital importancia para evitar cortos circuitos.

Este documento se basa primordialmente en el *IGBT* seleccionado, usando a su vez también las especificaciones de la hoja de datos.

REFERENCIAS

Antúnez, (2012) Estudio de Técnica de Modulación para el Inversor Multinivel en Cascada, Hibrido (Simétrico-Asimétrico), CENIDET.

Bárcenas, B. (2002) Análisis y Desarrollo de un inversor multinivel en cascada, CENIDET.

Cárdenas, G and Horta, M. (1994) Análisis y compensación del tiempo muerto en inversores utilizados en sai, pp. 69-73.

Chauca, Llerena, and Chico, (2014) "Diseño y Construcción de un inversor Multinivel," Epn, vol. 33, no. 1.

Deepa, Ajay, K. Sai, K. Koteswara, R. Mounika, and Medhini (2018) A study of comparative análisis of different PWM techniques Proc.2017 Int. Conf. Smarth Technol. SmartTechCon 2017, pp. 1144-1149.

Li, Li, Wang, Zhu, Chu, and Wang, (2011) Improving the performance of modular multilevel converter by reducing the dead time effect, Proc. 2011 14th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2011, no. 6.

Lin and Weiss, (2017) Multilevel converter with variable flying capacitor voltage used for virtual infinite capacitor, 19th Int. Symp. Power Electron. Ee 2017, vol. 2017-Decem, pp 1-6.

López, R. Andreu, and Ceballos, (2015) Técnicas de modulación para convertidores de fijación por diodos de tres niveles multifase y control eficiente de dispositivos captadores de energía de las olas, Universidad del País Vasco.

Portilla, (2017) Propuesta de nueva función PWM para circuitos inversores, BUAP.

Rashid, (2004) Convertidores CD-CD Electrónica de Potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones, pp 190-204.

Ravi, Rajpriya, and Kumarakrishanan, (2015) Desing and develoment of microcontroller based selective harmonic elimination for three phase voltage source inverter", Int. J. Appl. Eng. Res., vol. 10m no. 13, pp. 11562-11578.

Reyes, S. Aguayo, A. De León A and Carrillo, S. (2020) Comparative análisis of PD-PWM technique in the set: Multilevel Inverter-Induction motor, Ing. Investig. y Tecnol,. vol. 21, no. 1-8.

Ruderman, Reznikov, and Margaliot, (2008) Simple análisis of flying capacitor converter voltage balance dynamics for DC modulation, 2008 13th Int. Power Electron Motion Control Conf. EPEPEMC 2008, pp. 260-267.

Santana, (2009) Generador Solar de Energía eléctrica a 200W, UDLAP, pp. 28-38.

Shimmyo, Yuki, and Ohnishi, (2016) Toque ripple suppresion method with multilevel inverter and feedforward dead-time compensation, IEEJ J. Ind. Appl., vol. 5, no. 4, pp.360-369.

Villal and Salas, (2017) Modelado, simulación y control de convertidores en cascada, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.

ISSN en trámite

Diseño e implementación de compuerta lógica – analógica utilizando amplificadores operacionales.

González-Contreras J.*[,1], Acosta-Espinoza F. E.*[2,] Lozoya-Ponce R.E.*[3], Medrano-Hermosillo J.A.*[,4], Baray-Arana R.E.*[5], Cisneros-González R.R.[1]**

**Instituto Tecnológico Nacional de México / I.T. Chihuahua, División de Estudios de Posgrado e Investigación*
(e-mail: {m22060301[1], m22060300[2], ricardo.lp[3], jesus.mh[4], rogelio.ba[5]} @chihuahua.tecnm.mx).
***Ingeniería en Control Electrónico y Mecánico S.A. de C.V.*
(ricardocisneros@icem-mx.com)

Resumen: El presente artículo habla sobre la implementación y simulación de una compuerta lógica utilizando arreglos de amplificadores operaciones (OpAmps), de tal manera se obtiene un sistema hibrido (analógico-digital), el cual es reconfigurable y de bajo costo. El diseño se obtiene mediante las bases teóricas de las compuertas lógicas, para después pasar dicha información a la simulación y concluirla en un prototipo validado en laboratorio.

***Palabras clave**:* Compuerta lógica, Amplificador Operacional, Analógico-Digital, Reconfigurable.

1. INTRODUCCCIÓN

La teoría del algebra Booleana fue creada en 1854 por el matemático inglés George Boole. En su libro "*The laws of thought"*, introdujo el primer tratado sistemático de lógica y desarrolló para este fin un sistema algebraico conocido hoy en día como álgebra Booleana, J. Whitesitt (1961). Es así que la actual forma del algebra booleana difiere de la que en su principio fue creada por Boole, ya que la forma actual proviene del periodo de 1864 y 1895 dadas las contribuciones de William Stanley Jevons, August De Morgan, Charles Sanders Peirce y Ernst Schöder. Cabe mencionar que los fundamentos del álgebra booleana como una disciplina abstracta, axiomatizada por un conjunto de ecuaciones, fue dada por Edward Huntington en 1904, S. Givant (2009).

Diversos contemporáneos de Boole idearon la forma de crear máquinas que implementaran funciones Booleanas, en 1910 Paul Ehrenfest propuso utilizar el algebra booleana para crear interruptores automáticos para teléfonos en 1910, pero es hasta finales de la década de 1930 cuando esta idea fue desarrollada y marco el inicio de la era digital, J. Gregg (1998).

Las computadoras a lo largo del tiempo han sido fabricadas con diferentes tipos de componentes, tanto digitales como analógicos. De cierto modo, se puede decir que los interruptores electro-mecánicos utilizados en telefonía fueron los antecedentes de las computadoras actuales. Durante las décadas de 1940 y 1950, fueron hechas mediante tubos de vacío, para posteriormente, a través de la invención del transistor, adoptar esta nueva estructura. Actualmente basan su estructura principalmente en chips semiconductores fabricados a base de silicio, germanio o galio. Aunque, cabe mencionar que independientemente del material con que hayan sido fabricadas, los fundamentos teóricos que hacen posible su funcionamiento, siguen siendo los mismos, es decir, todas ellas están basadas en la lógica establecida por el algebra booleana.

Ahora bien, en el campo de la computación y la electrónica, existen tres maneras diferentes de realizar cómputo:

- **Microprocesadores de alto rendimiento.** Estos proveen un medio para lograr requerimientos de procesamiento de alta velocidad. Se caracterizan por ser flexibles, ya que cuentan con un conjunto amplio de instrucciones que permiten tener una implementación de tareas computables, T. J. Todman, (2005). Algunas de las desventajas que presentan son su limitada respuesta en altas velocidades, su alto consumo de potencia, así como su elevado costo de producción.
- **Circuitos integrados de aplicación especifica (ASICs).** Son dispositivos de hardware optimizados para realizar rápidamente tareas. Los ASICs son elementos previamente y permanente configurados siendo enfocados a un número pequeño de aplicaciones y en ocasiones solo una. Se puede decir que se caracterizan por tener un menor área y menor consumo de potencia en comparación de los microprocesadores programables, sin embargo, su mayor desventaja radica en que su ausencia de flexibilidad, es decir, por cada tarea especifica, implica desarrollar un nuevo sistema, M. Platzner, (1998).
- **Sistemas de cómputo reconfigurable.** Estos dispositivos contienen uno o más procesadores junto con una estructura reconfigurable sobre la cual

ISSN en trámite

unidades funcionales personalizadas pueden ser construidas, T. J. Todman, (2005). La principal diferencia y ventaja sobre un ASIC es que no se requiere fabricar uno por cada nueva aplicación que se realiza. Tanto la flexibilidad como su capacidad de reconfiguración, permiten crear plataformas sofisticadas que permiten un prototipado rápido y una temprana verificación de diseño P. C. Diniz, (2007).

Se considera como un dispositivo reconfigurable a todo circuito de propósito general que presente una estructura interna que pueda ser modificada por el usuario (o a petición de éste, por el fabricante) para realizar una amplia gama de aplicaciones.

De acuerdo con H. Peng (2011), existe una diferencia entre configuración y reconfiguración. Si el proceso de cambiar la estructura de un dispositivo reconfigurable ocurre al inicio del tiempo de ejecución se le conoce como un proceso de configuración. Mientras que reconfiguración es el proceso de cambiar la estructura de un dispositivo reconfigurable durante el tiempo de ejecución.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema analógico - digital reconfigurable. Se especifica el modelado, simulación e implementación del sistema más básico dentro de las estructuras lógicas, es decir, una compuerta lógica. El principal aporte de este proyecto radica en la implementación de un circuito que es capaz de obtener todo el conjunto de compuertas lógicas para un sistema de dos entradas y una salida, dando pie al manejo no solo de señales digitales, si no bien, señales analógicas. El sistema presentado se puede considerar como la base de una nueva generación de circuitos reconfigurables, ya que permite el incremento de entradas y salidas además de su sencilla implementación. Los resultados presentados en este artículo corresponden a los casos específicos de las compuertas AND, OR, XOR y XNOR.

2. ANTECEDENTES

2.1 Función AND

La función AND de dos bits, toma dos señales de entrada y produce una señal de salida. Su forma de operar consiste en que la señal de salida tendrá un valor a uno si y sólo si ambos bits de entrada contienen un igual a uno, en cualquier otro caso la salida será 0. El símbolo que representa la función AND es ∧.

La tabla de verdad de la función AND para todas las combinaciones de entradas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de verdad de la función Booleana AND.

X_1	X_0	$X_1 \wedge X_0$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

2.2 Función OR

La función OR por su parte, toma dos bits de entrada y produce un bit de salida. La forma en que opera es simple, la salida será cero si y sólo si ambos bits de entrada son cero, en cualquier otro caso la salida será uno.

El símbolo que representa a la función OR es ∨, aunque también se suele utilizar el símbolo +. En la tabla 2 se muestra la tabla de verdad de la función OR para todas las combinaciones de entradas de señales de dos bits.

Tabla 2. Tabla de verdad de la función Booleana OR.

X_1	X_0	$X_1 \vee X_0$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

2.3 Función XOR

La función XOR es una operación binaria que surge de la evaluación de la expresión (X1∧X0')∨(X1'∧X0), de tal manera que su salida será uno cuando los bits de entrada tengan distinto valor entre ellos.

El símbolo para denotar a esta función es ⊕. La Tabla 3 ilustra la representación de la función XOR.

Tabla 3. Tabla de verdad de la función Booleana XOR.

X_1	X_0	$X_1 \oplus X_0$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

2.4 Función XNOR

También conocida como equivalencia, coincidencia o NOR exclusiva, la función XNOR opera bajo la primicia de implementar la función XOR y posteriormente aplicar la función NOT al bit de salida resultante. La salida de esta función será uno cuando ambos bits de entrada tengan el mismo valor de entrada. La Tabla ilustra el comportamiento de la función XNOR, donde para representar la función XNOR se utiliza el símbolo ⊙.

Tabla 4. Tabla de verdad de la función Booleana XNOR.

X_1	X_0	$X_1 \odot X_0$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ISSN en trámite

2.5 Amplificador sumador inversor

El amplificador sumador inversor en un circuito que suma las señales de entrada en el amplificador, donde además es posible aplicar un factor de amplitud/atenuación a la señal de salida. Cabe resaltar que la salida se verá afectada por un factor negativo, es decir, la señal será negada. La Figura 1 representa el diagrama del circuito sumador, la ecuación (1) corresponde a la relación de las ganancias de las entradas con respecto de la salida.

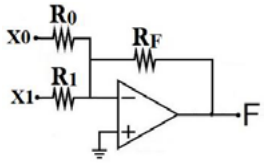


Fig. 1. Circuito sumador inversor.

$$F = -R_F\left(\frac{X_0}{R_0} + \frac{X_1}{R_1}\right) \qquad (1)$$

2.6 Amplificador comparador de ventana

Este circuito establece un umbral de operación dado por las comparaciones que realizan los dos amplificadores operacionales que lo conforman. En la entrada (+) del operacional superior se establece un margen superior (+K), mientras que en la entrada (-) del operacional inferior se establece un margen inferior (-K). La entrada V_{in} es común para ambos operacionales de tal forma que, si el valor de entrada V_{in} se encuentra entre los límites establecidos, la salida V_{out} será de 5V, por su parte la salida será 0V en caso contrario.

En la Figura 2 se representa el diagrama de este circuito, donde la ecuación (2) describe matemáticamente la salida del mismo.

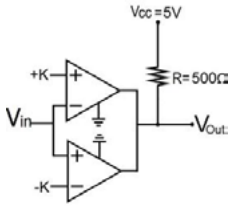


Fig. 2. Circuito sumador inversor.

$$V_{out} = \begin{cases} 5V, & (+K) > V_{In} \geq (-K) \\ 0V, & En\ otro\ caso \end{cases} \qquad (2)$$

3. DESARROLLO

3.1 Simulación

La simulación de tal circuito fue realizada en la plataforma MULTISIM 14.0, donde para el caso del sumador inversor se utiliza un amplificador operacional de propósito general TL074, tal como se ilustra en la Figura 3. Los valores de resistencias utilizados en este sistema, tanto en simulación como implementación, son los que se indican en la tabla en la figura 3.

En el caso del amplificador comparador ventana, se considera un amplificador comparador LM311, como el que se presenta en el diagrama de simulación de la Figura 4.

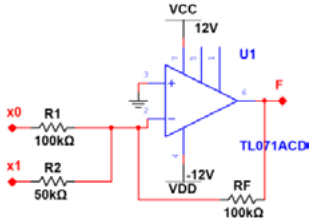


Fig. 3. Circuito sumador inversor.

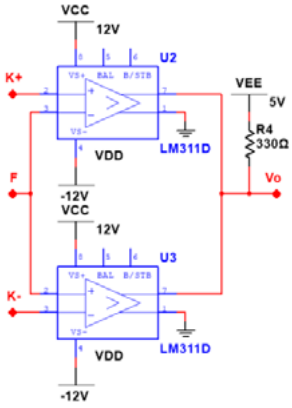
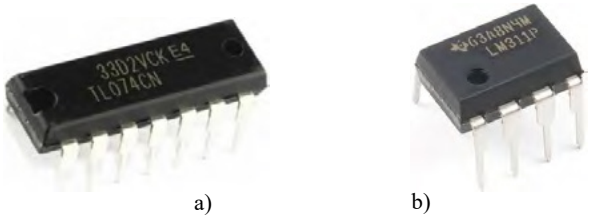


Fig. 4. Circuito comparador ventana.

3.2 Implementación

La implementación de la simulación fue prototipada mediante el uso de los siguientes elementos TL074 y LM311. La Figura 5 muestra su representación física.



a) b)

Fig. 5. Encapsulados genéricos utilizados. a) TL074. b) LM311.

ISSN en trámite

El ejercicio de implementación se realizó en las instalaciones del laboratorio de Potencia del Posgrado de Electrónica del Tecnológico Nacional de México / I.T. Chihuahua.

Para las fuentes de voltaje se utilizaron los modelos PS280 de la marca Tektronix; para las señales de entrada X_0 y X_1, generadores de funciones CFG280 de la marca Tektronix, así como multímetros 3435A de la marca HP y Osciloscopio TDS 3034B de la marca Tektronix. Ver Figura 6 para los equipos.



a)



b)



c)



d)

Fig. 6. Instrumentos de laboratorio utilizados. a) Fuentes Tektronix PS280. b) Generador de funciones Tektronix CFG280. c) Multímetro Hp 3435A. d) Osciloscopio Tektronix TDS 3034B.

4. RESULTADOS

4.1 Simulación

En la Figura 7 se presenta el resultado de la simulación del circuito sumador inversor, observe que las señales en color rojo representan los estados de las entradas X_0 (superior) y X_1 (inferior), siendo X_0 el doble de la frecuencia de X_1; se buscó ajustar los valores de ganancia de tal forma que las señales de entrada tengan voltajes que oscilan entre 0V-1V, para X_0 y 0v-2V para X_1; mientras en color verde se presenta el voltaje equivalente a la suma invertida de estas dos entradas, tomando así una secuencia de valores repetitiva que inicia en 0V y tiene decrementos de 1V por cada cambio de estado.

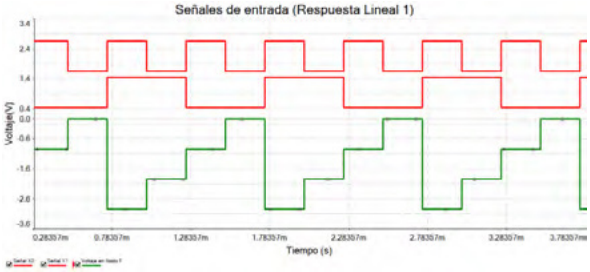


Fig. 7. Señales de entrada y respuesta lineal obtenida por la suma inversa de las entradas.

En las Figuras 8, 9 y 10 se muestra que utilizando esta respuesta lineal y mediante el ajuste del umbral de acción, es posible obtener las compuertas lógicas AND, OR y XOR. En todos los casos, la señal en color verde, representa la respuesta lineal obtenida por la suma inversa de las entradas, las señales en color rojo, representan el umbral de acción y en color negro la función booleana de salida obtenida.

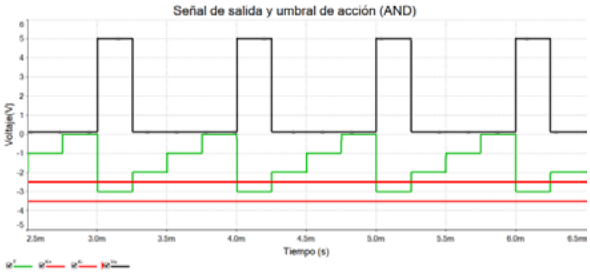


Fig. 8. Respuesta compuerta lógica en modo AND.

ISSN en trámite

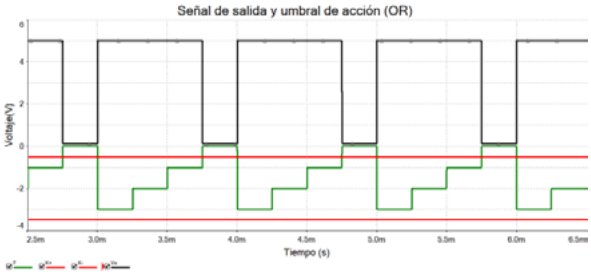


Fig. 9. Respuesta de una compuerta lógica en modo OR.

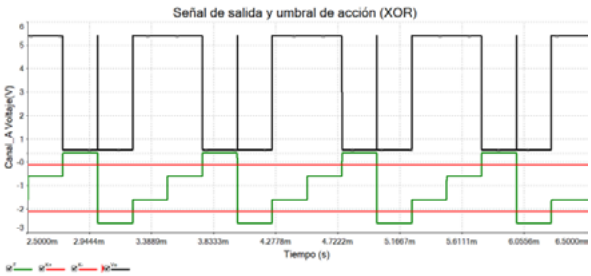


Fig. 10. Respuesta de una compuerta lógica en modo XOR.

Cabe mencionar que con esta configuración no es posible obtener funciones como la compuerta lógica XNOR, ya que la función no se soluciona mediante el uso de un único umbral. La propuesta de este trabajo de investigación radica en cambiar el signo de la entrada X_0, de tal forma que la respuesta lineal permita tener la forma de onda que se presenta en la Figura 11, la cual corresponde a una forma de onda lineal semejante a la anteriormente obtenida, pero con un desplazamiento, ya que al tratarse de una forma de onda complementaria, se habilita la posibilidad de obtener el conjunto restante de funciones lógicas.

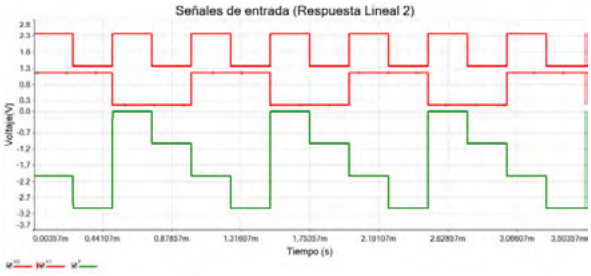


Fig. 11. Señales de entrada y respuesta lineal obtenida por la suma inversa de las entradas contemplando un valor negativo de X0.

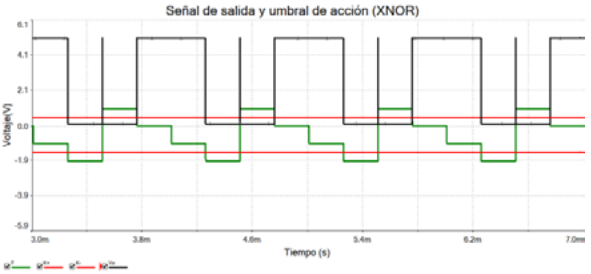


Fig. 12. Respuesta de una compuerta lógica en modo XNOR.

4.2 Implementación

Los resultados de la implementación de este sistema se muestran desde la Figura 13 a la Figura 18. Los valores tanto de resistencias como voltajes de alimentación y amplitudes de señales corresponden a los que se utilizaron en el ejercicio de simulación.

En la figura 13, se muestran tres canales, donde de color amarillo y rosa se presentan las respuestas en tiempo continuo correspondientes a las entradas x0 y x1, respectivamente. Mientras que de color azul se observa la respuesta lineal que esta suma (resta) genera, la cual es anteriormente denominada con la variable F. Observe que esta función corresponde a una línea recta con pendiente negativa.



Fig. 13. Señales de entrada y respuesta lineal obtenida por la suma inversa de las entradas.

En las figuras 14, 15, 16 se utilizan cuatro canales, siendo en color azul la respuesta de la variable F. En estos casos de representa con una línea color rosa a la variable +K, de color amarillo -K y en color verde la salida booleana referenciada en el diagrama de la Figura 2 como Vout. Al igual que en la simulación, se observa que con las variaciones de los niveles de +K y -K, es posible obtener las compuertas lógicas AND, OR y XOR; sin embargo, es posible obtener aún más funciones utilizando este tipo de respuesta lineal.

ISSN en trámite

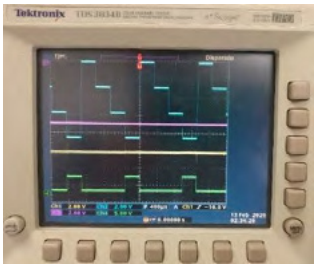


Fig. 14. Respuesta compuerta lógica en modo AND.

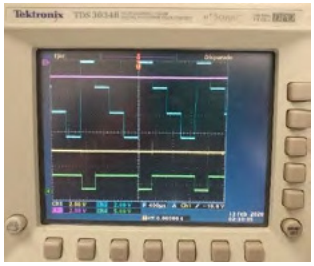


Fig. 15. Respuesta de una compuerta lógica en modo OR.

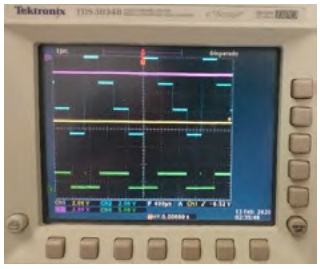


Fig. 16. Respuesta de una compuerta lógica en modo XOR.

Por otro lado, la figura 17, se presenta un resultado semejante a la figura 13, donde se observan tres canales, siendo de color amarillo y azul, las señales X0 y X1, respectivamente, mientras que la señal F se muestra en color rosa. En este caso cabe mencionar que la señal F es semejante al caso presentado en la figura 13, sin embargo, la principal diferencia radica en los niveles de voltaje que se obtienen al analizar las permutaciones que se generan con los cambios de voltaje de las entradas. Es así que se obtiene una respuesta lineal a trozos, lo que da la posibilidad de obtener un conjunto complementario de funciones lógicas, como lo es el caso de la compuerta XNOR.



Fig. 17. Señales de entrada y respuesta lineal obtenida por la suma inversa de las entradas contemplando un valor negativo de X0.

Por su parte, la figura 18 muestra cuatro canales, que de forma semejante a los resultados presentados en las figuras 14 -16, el canal rosa corresponde a +K, el canal azul -K, el canal amarillo a la señal F y en color verde la respuesta de salida lógica (XNOR).



Fig. 18. Respuesta de una compuerta lógica en modo XNOR.

Gracias a la combinación de estas variaciones de reconfiguración, es posible obtener todas las funciones lógicas para un sistema de dos entradas.

6. CONCLUSIONES

Las virtudes del trabajo se ilustran a continuación:

- Configuración y reconfiguración. – Ya que se permite realizar ajustes en los voltajes de entrada, mediante el ajuste de las resistencias R_0 y R_1, de forma semejante es posible ajustar los voltajes del umbral de acción, dando así la opción de reconfiguración cuando el circuito se encuentre en funcionamiento.
- Analógico – Digital. – El sistema presentado tiene la virtud de operar con señales analógicas y señales digitales, incluso presenta capacidad de poder operar con sistemas ternarios o de lógica difusa.
- Respuesta en frecuencia. – Al tratarse de un sistema basado en amplificadores operacionales, su velocidad de operación está determinada por estos componentes, siendo esta de frecuencias comúnmente hasta del orden de los MHz.
- El sistema presentado permite también incrementar el número de entradas, solo considerando agregar una

ISSN en trámite

resistencia extra por cada entrada nueva. De esta forma es posible no solo tener compuertas lógicas de dos entradas, si no bien incluso obtener sistemas lógicos combinacionales o estructuras más complejas.

REFERENCIAS

J. Whitesitt, Boolean algebra and its applications. Addison-Wesley series in the engineering sciences, Addison-Wesley Pub. Co., 1961.

S. Givant and P. Halmos, *Introduction to Boolean algebras*. Undergraduate texts in Mathematics, Springer-Verlag New York, 1 ed., 2009.

J. Gregg, *Ones and zeros: understanding Boolean algebra, digital circuits, and the logic of sets.* IEEE Press understanding science & technology series, IEEE Press, 1998.

T. J. Todman, G. A. Constantinides, S. J. E. Wilton, and O. Mencer, *Reconfigurable computing: Architectures and design methods*, IEE Proc. Comut. Digit. Tech., Vol. 152, No. 2, pp. 193-207, 2005.

M. Platzner, *Reconfigurable computer architectures*, e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 115, No. 3, pp. 143-148, 1998.

P.C. Diniz, E. Marques, K.Bertels, M. M. Fernández and J.M.P. Cardoso, *Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications.*Third International Works-Hop, ARC 2007, mangaratiba, Brazil, March 27-29, 2007, Proceedings, Vol. 4419 of Theorical Computer Science and General Science and General Issues. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

H. Peng, G. Hu, L. Li, Y. Yang, and J. Xiao, *Constructing Dynamic multiple-input multiple-output logic gates*, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2011, No. 380345, 2011.

ISSN en trámite

Implementación en FPGA de cifrado en canal de comunicación, basado en autómatas celulares.

Acosta-Espinoza F. E. *·[1], González-Contreras J.*·[2], Lozoya-Ponce R.E.*·[3], Medrano-Hermosillo J.A.*·[4], Campos-Soto H.V.*·[6], Martínez-Alvarado L.E.*·[7],

**Instituto Tecnológico de Chihuahua: División de Estudios de Posgrado e Investigación gs*
(e-mail: {m22060300[1], m22060301[2], ricardo.lp[3], jesus.mh[4], l16061240} @chihuahua.tecnm.mx).
*** Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de Ingeniería*
(email: luis.ema@ingenieria.unam.edu)

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados de la implementación de un autómata celular de 3 entradas y una salida, para el cifrado en tiempo real de un canal de comunicación de una vía de transmisión. Para la implementación del sistema se utilizaron dos tarjetas FPGA DE0-CV de Intel/Altera, sistema transmisor – receptor.

***Palabras clave**:* Autómata Celular, Cifrado XOR, FPGA.

1. INTRODUCCCIÓN

Hoy en día la protección digital de datos se ha tornado en un caso de estudio muy interesante, ya que involucra actividades tanto de instituciones publicas como privadas. Al manejar grandes cantidades de información, es común que datos personales como claves bancarias y contraseñas, por mencionar un par de ejemplos; sean foco de atención de personas que ven un área de oportunidad, al buscar vulnerar la seguridad y así tener acceso a esta información, dando otro tipo de uso no autorizado a estos datos, perjudicando de manera directa a los usuarios. Es por ello que el cifrado de información cobra alta relevancia, ya que su objetivo es proteger datos e información digital, buscando garantizar que esta solo sea accesible a cierto personal autorizado, Garey (1979).

Actuales sistemas de cifrado, basan su comportamiento en sistemas caóticos, Maazouz(2021), Yasser(2020), lo que incrementa considerablemente su complejidad de implementación al considerar digitalizar sistemas complejos como lo son osciladores caóticos. Una solución que se utiliza hoy en día es el manejo de S-Box, sin embargo, la complejidad en la programación de estos sistemas resulta ser elevada en comparación del cifrado XOR.

En este trabajo se presentan los resultados de la implementación en un FPGA de un autómata celular reversible para cifrado y descifrado de datos, ya que, por sus propiedades matemáticas y su facilidad de diseño, resulta ser un excelente candidato en la aplicación de sistemas de cifrado.

2. ANTECEDENTES

2.1 Autómatas celulares

Un autómata celular es una *lattice* infinita de máquinas de estado finito, llamadas células. Una *lattice* es definida como una cuadrícula de enteros (Z) entendida infinitamente. Las células son colocadas en los puntos de una *lattice* del espacio Euclidiano d-dimensional. Se refiere a cada una de las células por sus coordenadas, es decir, las células son direccionadas por elementos de Z^d. Sea S un conjunto finito de estados, una configuración del Autómata celular es una función:

$$c: Z^d \rightarrow S \qquad (1)$$

Donde *c(x)* es el estado actual de la célula *x*. El conjunto S^{Z^d} de todas las configuraciones es denotado como $C(d,S)$, o también se denota sólo como C en el caso en el que d y S sean conocidos.

Las células cambian de estado en forma sincronizada considerando pasos discretos de tiempo, de forma semejante, para el siguiente estado, cada célula depende directamente del estado actual de sus células vecinas y de la regla de actualización que se haya definido.

Es así, que la misma regla de actualización debe ser usada para todas las células implementadas, esta regla se aplica en tiempo real y de forma paralela para cada una de ellas.

Un vecindario puede ser especificado como el desplazamiento relativo con respecto a cada célula. Es decir:

$$N = (x_1, x_2, \cdots, x_n) \qquad (2)$$

Un vector de n elementos distintos de Z^d, entonces los vecinos de una célula en la ubicación $x \in Z^d$ son las n células en la ubicación $x+x_i$, para $i = 1, 2, \ldots, n$.

ISSN en trámite

La función local es una función:

$$f \ : \ S^n \rightarrow S \qquad (3)$$

donde n es el tamaño de la vecindad. El estado $f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ corresponde al nuevo estado de una célula cuyos n vecinos estuvieron en los estados $a_1, a_2, \dots, a_n$ para el anterior estado de tiempo. La regla de actualización determina la dinámica global de un Autómata celular: La configuración c se convierte en un paso de tiempo en la configuración e, donde para toda $x \in Z^d$:

$$e(x) \ = \ f(c(x+x_1), c(x+x_2), \cdots, c(x+x_n)) \qquad (4)$$

Se dice entonces que $e=G(c)$, y se nombra a $G : C \rightarrow C$ como la función de transición global del autómata celular, Dieter (2005), J.M., Martínez (2014).

2.2 Autómata de Wolfram

Wolfram S. (1986, 2002) representa un autómata de una dimensión (1D), utilizando dos parámetros (k,r), donde k, representa el número de estados del conjunto y r, el número de vecinos con respecto a una célula central. Las células vecinas se encuentran ubicadas a la izquierda y a la derecha, en igual número con respecto a la célula central, Wolfram (2002), por lo tanto, los vecinos junto con la célula central forman una vecindad como se ilustra en la Figura 1.

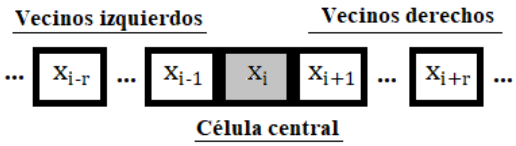


Fig. 1.- Vecindad de tamaño $2r+1$.

Es así que un autómata celular se puede representar como el sistema $\{\sum, r, \rho, c_i\}$. Donde $\sum$, es el conjunto de estados, r el número de vecinos con respecto a una célula central, ρ la función de transición y c_i la configuración inicial del sistema. El conjunto de estados puede ser acotado determinando su cardinalidad $|\sum| = k$ por lo tanto $k \in Z$ y el conjunto $\sum$ es numerable como $\sum=\{0,1, \dots, k-1\}$; entonces se define un arreglo lineal asociado a una posición *i-ésima* a una sucesión de $x_i \forall$ i $x_i \forall i \in Z$ y $x \in \sum$.

Se analiza un autómata celular de orden (2,1), en este caso k=2, lo que indica el número de elementos en el conjunto $\sum$, estos dos elementos se representan como $\sum=\{0,1\}$, el parámetro $r=1$, indica que debe haber un vecino tanto a la izquierda y derecha con respecto a la misma célula central. El número de vecinos en total es igual a $2r = 2(1) = 2$, es decir, el vecino a la izquierda y el vecino a la derecha. Se puede confirmar así que la vecindad es igual a $2r + 1 = 3$ células, los dos vecinos más la célula central determinan las tres células de la vecindad. De esta forma, el posible número de permutaciones que se obtienen es igual a $k^{2r+1} = 2^{2(1)+1}=8$. Por lo tanto, el número de diferentes reglas que se derivan de este autómata son 256.

Una representación gráfica de este autómata consiste en tomar casillas binarias, donde una casilla en color blanco representa un valor de 0 y una casilla en color negro representa un valor 1.

Algunas de las reglas que mencionan en el libro de Wolfram se presentan en la figura 2.

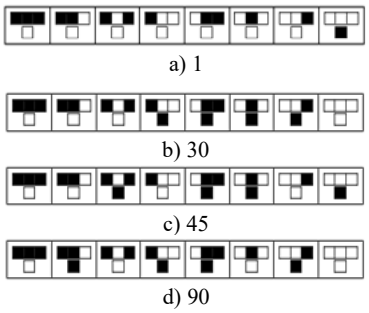


Fig. 2.- a) Regla 1, b) Regla 30, c) Regla 45, d) Regla 90.

En la figura 3 se presentan algunos de patrones que se obtienen con este autómata y con las configuraciones de las reglas presentadas en la figura 2, cabe mencionar que en todos los casos se toma la misma condición inicial.

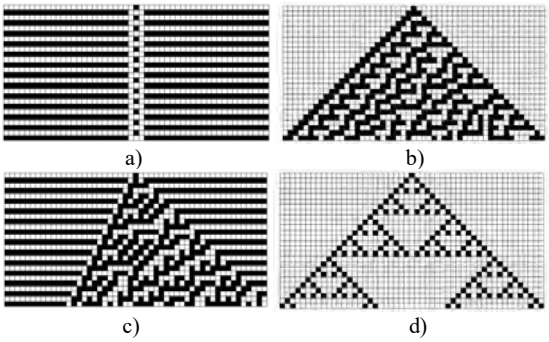


Fig. 3.- a) Regla 1, b) Regla 30, c) Regla 45, d) Regla 90.

2.3 Criptografía

La palabra criptografía, proviene del griego *kryptos* y que bien se puede interpretar como *escondido* y *graphein*, que se interpreta como *escribir*, de forma general se puede decir que se refiere al arte y ciencia de hacer una comunicación incomprensible para un público general, exceptuando a un grupo reducido de personas.

Uno de los primeros sistemas de escritura secreta de los cuales se tiene referencia corresponde a los jeroglíficos, que datan de 4000 años.

Los orígenes de la escritura secreta pueden ser remontada hace 4000 años con el sistema de escritura de jeroglíficos de los egipcios. Mas adelante en 1918 las técnicas de cifrado tomaron particular interés durante la segunda guerra mundial,

ISSN en trámite

específicamente con la maquina Enigma, la cual era utilizada para desencriptar mensajes del ejército.

En criptografía, el cifrado XOR utiliza la OR exclusiva sobre cada uno de los bits del dato que se pretenda cifrar, para ello utiliza una llave de la misma longitud de bits. Para descifrar la salida, solo hay que volver a aplicar el operador XOR con la misma clave.

3. DESARROLLO

Para el desarrollo del sistema, se utilizaron dos tarjetas de desarrollo DE0-CV de Intel/Altera, las cuáles utilizan un FPGA cyclone V, modelo 5CBA4F23C7N. Una de las tarjetas fue utilizada como transmisor, en la cual el dato a enviarse es cifrado y enviado a través de un puerto de GPIO, mientras que la otra se encargó de descifrar el mismo, y mostrarlo en los leds que incluye la misma.

El algoritmo de cifrado de los datos, se basa en el uso de autómatas celulares con 3 células, mediante los cuales se obtuvieron los vectores de encriptación (o llaves), con las cuáles posteriormente se realizó el cifrado XOR con el dato a encriptar. Para obtener estos vectores, se partió de una condición inicial establecida arbitrariamente, a la cual se aplicó la regla de manera iterativa a cada uno de los bits; este proceso se muestra en la figura 4.

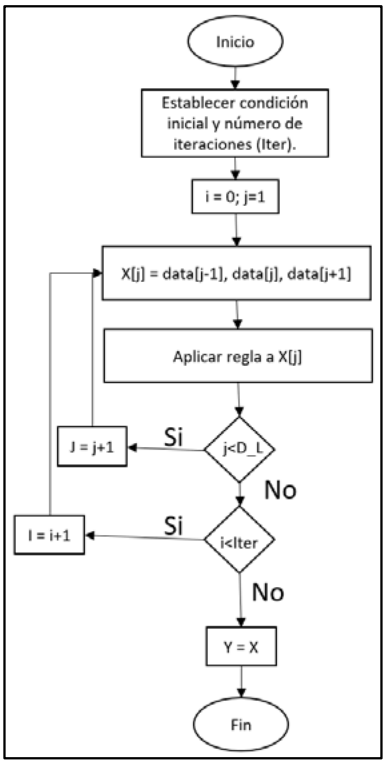


Fig. 4.- Diagrama de flujo para obtención de series de bits a partir de reglas mediante autómatas celulares (D_L.- Data Length; iter.- Número de iteraciones).

Dada la naturaleza del curso de electrónica digital avanzada, materia que actualmente se está cursando en nuestro primer semestre de maestría en electrónica, se sugirió el uso de la plataforma “Quartus II” y el lenguaje de descripción de hardware Verilog como herramientas para la implementación de este proyecto, sin embargo, los alumnos consideran existen múltiples opciones para el desarrollo de este proyecto.

En este caso se utilizaron series de 10 bits, ya que, por las limitaciones mismas del autómata, el LSB y MSB se desprecian, debido a que para poder alterar sus valores necesitarían tener un bit antes o después respectivamente. Se aplicaron dos reglas distintas (90 y 45), con la finalidad de obtener un nivel de cifrado más complejo, en la figura 5, se puede observar el comportamiento de ambas reglas con 12 iteraciones, siendo los bloques grises un “1” lógico, y los blancos un “0” lógico (se tienen bloques blancos en ambos costados, representando los LSB y MSB).

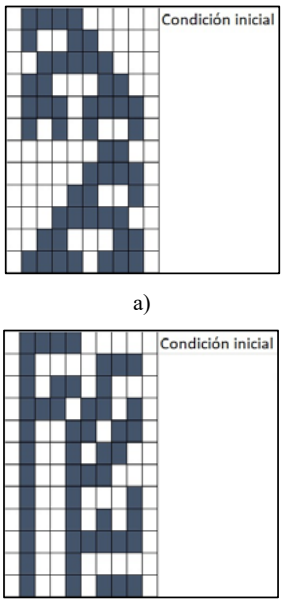


Fig. 5.- Evolución del autómata utilizando a) Regla 90, b) Regla 45.

Una vez obtenidos los bits de las reglas, se utilizaron estos como llaves de encriptación y se aplicó una operación doble de cifrado XOR del dato con ambas series de bits. El dato cifrado es transmitido mediante el puerto GPIO a la tarjeta receptora. El proceso de cifrado se muestra en la figura 6.

ISSN en trámite

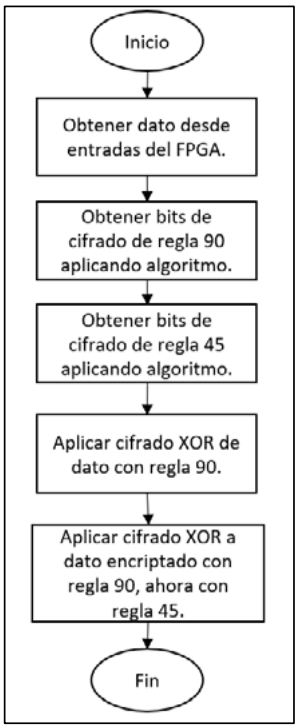


Fig. 6.- Diagrama de flujo para encriptación de datos.

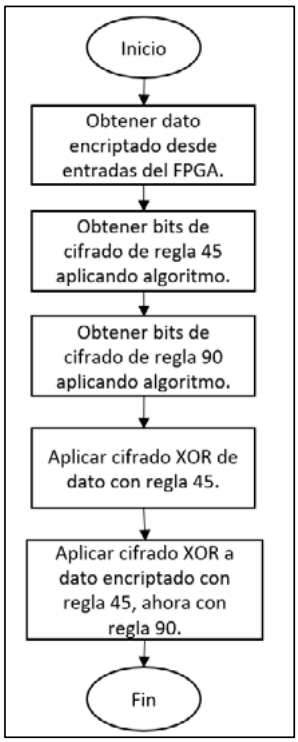


Fig. 7.- Diagrama de flujo para desencriptado de datos.

Ahora bien, para el proceso de desencriptado, se obtienen los bits correspondientes a las llaves de cifrado, utilizando la misma condición inicial, cantidad de iteraciones y el comportamiento de las reglas del autómata celular; cabe mencionar que, al tratarse del mismo autómata, es muy importante que tanto el número de iteraciones como la regla que rige al mismo, sean idénticas, ya que la más mínima variación se verá reflejada en un resultado erróneo. Una vez obtenidos los bits de la llave, se aplica el cifrado XOR para desencriptar el dato. Este algoritmo es descrito en la figura 7.

4. RESULTADOS

En la figura 8 se muestran los resultados simulados de datos codificados, siendo "data" el dato original, y "crip_data" el dato encriptado.

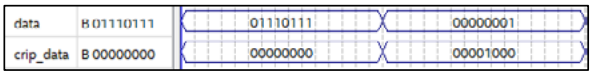


Fig. 8.- Simulación de encriptación de datos.

En la figura 9 se pueden visualizar las dos tablillas interconectadas, teniendo del lado izquierdo el transmisor (codificador) y del lado derecho el receptor (decodificador). Los leds encendidos son los correspondientes a los datos enviados y recibidos respectivamente, mientras que el dato original (el cuál es encriptado y enviado) es "$10101100_{(b)}$".

ISSN en trámite

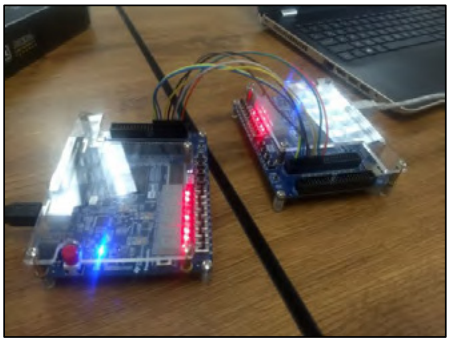


Fig. 9- Sistema de codificación y decodificación.

En la figura 10, se puede observar que los recursos utilizados por la tarjeta Cyclone V son menores al 15% en cada uno de sus rubros, lo que indica que, a pesar de programar un sistema tan complejo como el autómata de Wolfram, el consumo es mínimo para una tarjeta de este tipo (kit de desarrollo académico).

Family	Cyclone V
Device	5CEBA4F23C7
Timing Models	Final
Logic utilization (in ALMs)	3 / 18,480 (< 1 %)
Total registers	8
Total pins	27 / 224 (12 %)
Total virtual pins	0
Total block memory bits	0 / 3,153,920 (0 %)
Total DSP Blocks	0 / 66 (0 %)
Total HSSI RX PCSs	0
Total HSSI PMA RX Deserializers	0
Total HSSI TX PCSs	0
Total HSSI PMA TX Serializers	0
Total PLLs	0 / 4 (0 %)
Total DLLs	0 / 4 (0 %)

Fig. 10.- Uso de recursos de la tarjeta.

5. CONCLUSIONES

Se consiguió implementar un sistema de cifrado basado en autómatas celulares. Este sistema depende para su descifrado de 3 características independientes entre ellas, que deben concordar tanto en el transmisor como en el receptor. Estas características son las reglas de los autómatas a utilizar, la condición inicial para obtener los bits de cifrado, y las iteraciones a realizar para ello.

Una de las principales diferencias que ofrece este algoritmo, en comparación con algunos otros, es la baja cantidad de recursos del sistema y de programación; ya que en comparación de sistemas actuales que basan su generado de llaves en sistemas aleatorios o caóticos, el sistema aquí propuesto, es capaz de implementarse con un simple cifrado XOR.

Otra ventaja observada es que, al ser el FPGA un dispositivo que reconfigura el hardware, el sistema implementado es en última instancia la interconexión de distintos componentes, sin requerir de un procesador (cómo sería el caso de otros sistemas de encriptado), lo cuál permite que tanto el encriptado, la transmisión de los datos, y el desencriptado, sean casi en tiempo real. El objetivo principal de este proyecto fue implementar el sistema de cifrado basado en autómatas celulares en un FPGA, lo que servirá como base para trabajos futuros.

REFERENCIAS

Garey, M., and Johnson, D. (1979), Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completness, 1ed. W.H. Freeman, New York.

Dieter A. Wolf-Gladrow (2005), Lattice – Gas Cellular Automata and Lattice Boltzman Models, Lecture Notes in Mathematics, vol 1725. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.

J.M. Martínez (2014), Cifrado y descifrado de patrones usando autómatas celulares reversibles, Tesis para obtener Maestría en ciencias de la computación, IPN, 2014.

Wolfram, S. (2002), A new kind of science, Wolfram Media, 2002.

Wolfram, S. (1986), Theory and aplications of celular automata, World Scientific Press, Singapore, 1986.

Konheim, A.G. (1981), Criptography: a Primer, 1ed. Wiley-Interscience, United States of America, 1981.

Yasser, I., Mohammed, M., Samra, A. Khalifa, F. (2020), A Chaotic-Based Encryption/Decryption Framework for Secure Multimedia Communications, Entropy MDPI, 2020.

Maazouz, M., Toubal, A., Bengherbia, B., Houhou, O., Batel, N. (2021), FPGA implementation of a chaos-based image encryption algorithm. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, 2021.

ISSN en trámite

DESARROLLO DE UN TAPETE SANITIZADOR DE CALZADO POR MEDIO DE LUZ ULTRAVIOLETA

Rubén Arcángel Flores Lechuga*[a]. Rubén Posada-Gómez. **[b]
José Pastor Rodríguez-Jarquín*[c], Albino Martínez-Sibaja*[d]

**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: 2711526755; e-mail: M14010679@orizaba.tecnm.mx).
[b](e-mail:ruben.pg@crodeorizaba.tecnm.mx).
[c](e-mail: jose.rj@orizaba.tecnm.mx).
[d](e-mail: amartinezs@orizaba.tecnm.mx).

Resumen: Actualmente, las regulaciones sanitarias por la pandemia del COVID-19 recomiendan algún sistema para impedir el acceso de microorganismo en los establecimientos y lugares públicos a los que se desee ingresar, en este sistema se busca realizar una desinfección de los artículos personales que llevamos con nosotros, tales como nuestra ropa, calzado etc. para reducir el riesgo de contagios que pudieran ocasionar, por lo general el sistema que se encuentran en los establecimientos constan de una persona que se encarga de rociar algún tipo de bactericida con base en agua que hará el proceso de desinfección, además de efectuar una medición de la temperatura generalmente con un termómetro infrarrojo. En este artículo, se presentan los avances en el desarrollo de un tapete sanitizador de calzado por medio de luz ultravioleta de manera que se integre en un sistema que se encargue de monitorear el acceso de cada persona, realizando una desinfección del calzado por medio de una luz ultravioleta tipo C generada por un tubo de mercurio la cual se encargará de inactivar cualquier microorganismo que pudiera encontrarse en la suela del calzado de la persona que ingrese, reduciendo el riesgo de contagios.

Palabras clave: Sanitización, Luz ultravioleta, Control de acceso, Desinfección.

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia del Covid-19 ha transformado y afectado a nivel mundial los servicios de salud, obligando a encontrar técnicas efectivas para la desinfección de áreas de atención. En esta búsqueda se han desempolvado antiguas estrategias que se encontraban subutilizadas como el uso de luz ultravioleta. (Mackenzie D. 2020).

Actualmente las enfermedades microbianas transmitidas por el aire, tales como la influenza, tuberculosis, etc. Representan importantes desafíos para la salud pública. (R. Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M. I., & Pizarro., 2001).

Las IAAS, antes conocidas como infecciones nosocomiales, se definen como infecciones asociadas a la atención en salud, cualquiera sea su contexto (por ejemplo, en hospitales, centros para hospitalizaciones prolongadas, instalaciones comunitarias / ambulatorias o instancias de cuidado en el hogar o centros comunitarios). Una IAAS es una infección localizada o sistémica que se desencadena a partir de una reacción adversa a la presencia de uno o varios agentes(s) infeccioso(s) o su toxina(s), sin que haya evidencia de su presencia previa a la admisión en el centro de atención en salud respectivo. Usualmente, se considera que una infección corresponde a una IAAS si se manifiesta al menos 48 horas después de la admisión. (Unahalekhaka, A. 2011).

ISSN en trámite

La luz ultravioleta es la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible. Se han definido cuatro regiones del espectro UV- vacío UV entre 100 y 200nm, UVC entre 200 y 280nm, UVB entre 280 y 315nm, y UVA entre 315 y 400nm (Meulemans, 1986).

La aplicación práctica de la desinfección UV se basa en la capacidad germicida de UVC y UVB. (Wright, H., & Cairns, W. 1998).

. Los microbios son destruidos por la radiación ultravioleta cuando la luz penetra a través de la célula y es absorbida por el ácido nucleico, esto provoca una reordenación de la información genética lo que interfiere con la capacidad reproductora de la célula. por consiguiente, los microorganismos son inactivados por la luz UV como resultado del daño fotoquímico que sostiene el ácido nucleico. (Wright, H., & Cairns, W. 1998).

2. PROBLEMÁTICA

En la actualidad existen diversos métodos para realizar algún tipo especifico de desinfección, desde aquellos dirigidos a la eliminación de microorganismos que se encuentran en: espacios inanimados, el aire, objetos personales o de uso especial como los quirúrgicos.

La desinfección es el proceso que consiste en eliminar a microorganismos infeccioso mediante el uso de agentes químicos o físicos. (Block, S. S. (Ed.). 2001).

Los agentes antimicrobianos designados como desinfectantes son a veces utilizados alternativamente como agentes esterilizadores, agentes de saneamiento o antisépticos. En su mayoría, los desinfectantes que se usan en sanidad animal son productos químicos antimicrobianos o biocidas relativamente potentes y generalmente tóxicos que se aplican sobre las superficies contaminadas, mientras que los que se usan en la industria agroalimentaria son generalmente menos tóxicos y también menos concentrados. (Kahrs, R. F.1995).

La principal fuente de dispersión del virus son las gotas y aerosoles que los humanos emitimos cuando respiramos, hablamos, tosemos y estornudamos, de ahí la importancia de llevar mascarillas. Al hablar emitimos miles de microgotas de fluidos orales por segundo y que estas pueden permanecer hasta 14 minutos en el ambiente lo que supone la principal fuente de transmisión del virus. (Damborenea, J. D., Conde del Campo, A., García Diego, I., & Arenas, M. A. 2020).

Esto ocasiona que muchos microorganismos se queden en el suelo, (calles, banquetas, pisos) por lo cual nosotros al caminar sin darnos cuenta nuestra suela del calzado retiene estos microorganismos y haciendo que estos ingresen a nuestros centros de trabajo, hogares, comercios etc. Aumentando la posibilidad de contraer alguna enfermedad debido a alguno de estos microorganismos.

3.- JUSTIFICACIÓN

Desde hace ya muchos años es común que la mayoría de las personas adquieran sus productos de uso diario en diversos centros comerciales o supermercados, es bien sabido también que la afinación del ser humano es siempre estar rodeado de personas, ya sea para convivir con ellas en alguna actividad como tomar un café o bien el simple hecho de estar en el cine viendo una película aun sin estar conviviendo con ellas directamente, y es por esto que muchas de las ocasiones sin darnos cuenta adquirimos alguna enfermedad, debido al contacto indirecto con ciertas personas.

La tecnología cada vez se hace más presente en nuestra vida, desde que entramos a algún centro comercial podemos notar que cuentan con puertas automáticas que se abren al detectar nuestra presencia, sin embargo, esto solo causa que las personas accedan sin ningún tipo de orden a estos establecimientos ocasionando que se hagan aglomeraciones de personas en las entradas de estos establecimientos, lo cual puede ser algo muy común, pero en situaciones de pandemia como la que estamos viviendo actualmente es un gran problema, ya que las personas están en contacto directo con otras que pudieran estar infectadas por algún microorganismo.

La luz ultravioleta ha logrado demostrar su eficacia en diversos métodos de desinfección, desde agua para el

ISSN en trámite

consumo humano, ozono para espacios cerrados y ahora muestra una excelente eficacia para la esterilización del virus del SARS-Cov-2, llegando a ser una de las opciones más factibles para la desinfección de diversos objetos, como en este caso la suela del calzado que es la más expuesta a virus, bacterias y diferentes microorganismos que se encuentran en el suelo.

4.-OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un tapete que realice la acción de sanitizar por medio de luz ultravioleta mediante el uso de actuadores, sensores, microcontroladores e interfaces gráficas para reducir el riesgo a contraer algún microorganismo por estar en un contacto cercano a alguna persona, además de impedir el ingreso de nuevos microorganismos que se encuentran en el suelo a lugares cerrados por medio del calzado.

5.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una investigación exhaustiva para conocer a detalle los antecedentes que pudiera tener el proyecto, y estos sean base para demostrar el grado de innovación que tiene el mismo.
- Desarrollar un marco teórico para definir el cómo se desarrollará e implementará el tapete sanitizador de calzado por medio de luz ultravioleta e identificar la secuencia para el desarrollo de nuestro proyecto de tesis.
- Analizar el diseño en el cual nos basaremos para realizar el tapete sanitizador de calzado por medio de luz ultravioleta todo esto para determinar las variables que sean de interés y que se vayan a automatizar.
- Definir el tipo de sensores, actuadores, microcontroladores y software adecuados para el proceso que queremos realizar.
- Diseñar e implementar el tapete sanitizador de calzado por medio de luz ultravioleta, realizar una experimentación que nos permita retroalimentar los pros y contras que tenemos para mejorar el proyecto.
- Tomar nota de la experimentación para poder generar reportes y resultados del sistema para poder desarrollar productos académicos y anexarlos a nuestra tesis.

6.-DESARROLLO

Para el Desarrollo de este prototipo se contempló el uso de una lampara de mercurio TUV 25 W T8 25PK marca Philips utilizada principalmente para la eliminación de patógenos que se pudieran encontrar en el agua que se busca hacer potable, la lampara tiene una longitud de 450mm de largo y un diámetro de 28mm, además funciona con un voltaje de 48VCA, una corriente de 0.612A y se maneja en una longitud de 250nm en el espectro electromagnético, asegurando que irradia una Luz ultravioleta tipo C, el cual es el recomendado para realizar procesos de sanitización.

Posteriormente se elaboró un plano de la estructura del proyecto en el software SolidWorks, se consideraron las medidas necesarias para que una persona adulta de hasta 1.90 metros pueda subir sin problemas en la estructura, se realizaron 10 perfiles para este tapete de estos perfiles 6 tienen las medidas de 1m de largo × .1 m de ancho × 0.03 m de grosor y un peso aproximado de 2 kg c/u, los otros 4 perfiles tienen las medidas de .5m de largo ×.1 m de ancho × 0.03 m de grosor y un peso aproximado de 1 kg c/u.

Con el fin de que la luz ultravioleta irradie directamente a la suela del calzado se utilizó un vidrio de cristal templado de .9m de largo × .4m de ancho x .012m y con un peso aproximado de 12.5 kg el cual permite que la radiación que inactivara los diversos microorganismos, traspase con pérdidas mínimas de reflexión la radiación UV-C y no haya perdidas de energía en esta transición, el espesor del cristal templado se consideró debido a que necesita tener la resistencia para soportar una persona.

Además, para realizar el control de acceso se utilizaron módulos de sensor Ir infrarrojo, los cuales funcionan con 5v ya que están diseñados para ser usados como módulos de la plataforma Arduino. Estos módulos nos ayudaran a detectar cuando una persona se acerque y mandara un pulso haciendo que inicie el proceso de nuestro tapete se encargaran de

ISSN en trámite

contar cuantas personas ingresen para tener el número de los que ingresaron, accionara la luz ultravioleta y también de accionara los servomotores.

Para los servomotores se utilizaron los servomotores Mg 995 Towerpro de 15 kg con 180° de libertad, trabajan con 12vcd, que levantaran la pluma para permitir el acceso una vez se detecte la presencia de una persona,

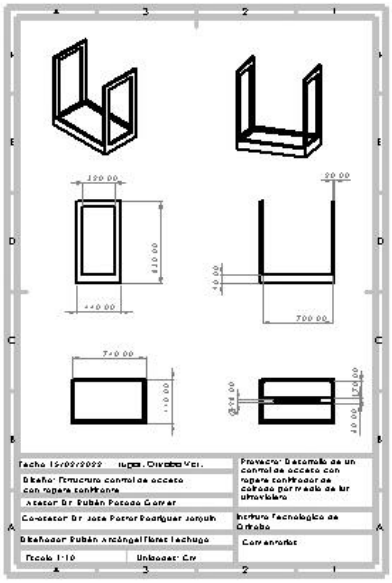


Figura 1. Planos de estructura para el prototipo 1.

7.-RESULTADOS

El primer paso para el desarrollo de este proyecto, fue el diseñar la estructura, en este caso se utilizó el software SolidWorks para realizar el diseño (Figura 1). y posteriormente se hizo con perfiles de madera, debido a que como fue un primer prototipo la madera nos permite modificar de una manera simple cualquier mejora que se le desee hacer posteriormente.

En el diseño se colocaron los diversos sensores posicionados en secciones que permitían detectar de buena forma a las personas que se acercaran.

Para hacer la red de sensores se interconectaron y aislaron por medio de tubos de PVC y se colocaron debajo del cristal templado para que cuando una persona se parara sobre el se encendiera la lampara germicida, además de que como ya se mencionó tendrá el número exacto de las personas que ingresen al establecimiento por medio del prototipo (Figura 2).



Figura 2. Prototipo 1 ensamblado con todos sus componentes.

Para que el prototipo funcionara de forma óptima es necesario ensamblar todo en una sola tarjeta electrónica (Figura 3) que se encargue de unir todos los componentes del prototipo con la tarjeta de control que en esta ocasión estará conformada por un Arduino nano que realizara la tarea de controlar todo el sistema, pero además para evitar colocar módulos externos a este se agregaron a la tarjeta electrónica optoacopladores en cada entrada analógica para tener una protección en caso de que existiera algún cortocircuito, así como también se colocaron en las salidas digitales transistores 4n225 y relevadores que se excitaran en caso de mandar alguna señal, esto reducirá considerablemente el uso de módulos externos de Arduino.

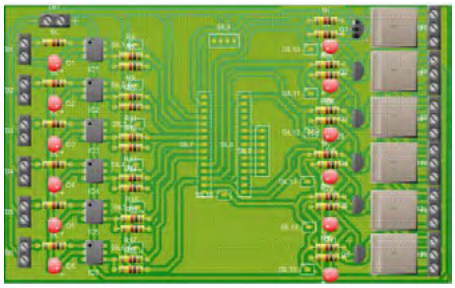


Figura 3. Tarjeta electronica que ensamblara arduino nano con prototipo 1

ISSN en trámite

En la actualidad el poder visualizar los procesos de cualquier sistema o proceso es indispensable para facilitar el uso y la comprension de lo que esta sucediendo en tiempo real, por ello se implemento una interfaz grafica utilizando el lenguaje de python y el programa de QT designer (Figura 4.), en el cual se podria visualizar cuando el prototipo detectara una persona y se activara el motor para abrir la primera y segunda barrera para que ingresen las personas ademas de detectar cuando la persona este parada sobre el prototipo y realizar todo el proceso.



Figura 4. Interfaz Gráfica de prototipo 1.

Cabe destacar que como trabajo a futuro se contempla la validacion del prototipo debido a que es importante que se cuenten con con pruebas de la eliminacion de los diversos microorganismos, sin embargo apoyandonos de la bibliografia investigada que aseguran la eliminacion de diversos microrganismos podemos continuar en los avances del proyecto y esperar que los resultados sean favorables en la siguiente fase.

9. CONCLUSIÓN

Es necesario implementar un sistema electrónico con diversos sensores y actuadores que indique a las personas como deben de ir ingresando de manera ordenada y progresiva, para reducir los tiempos de aglomeración, conservar una distancia recomendable y además una sanitización de manera correcta la suela del calzado, sin necesidad de tener que contar con una persona que realice todo este proceso, con ayuda de la interfaz gráfica el encargado del acceso podrá visualizar lo que está sucediendo en tiempo real sin necesidad de tener que estar expuesto a interactuar con las personas que quieran ingresar al establecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido desarrollado con el apoyo del Tecnológico Nacional de México Campus Tecnológico de Orizaba y CRODE de Orizaba, así como del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.

REFERENCES

Block, S. S. (Ed.). (2001). Disinfection, sterilization, and preservation. Lippincott Williams & Wilkins.

Damborenea, J. D., Conde del Campo, A., García Diego, I., & Arenas, M. A. (2020). COVID-19:¿ Se pueden dotar a las superficies metálicas con propiedades antivíricas?.

Fiamoncini, B. F., Rowan, N. and Garvey, M. (2014) "Inativação de bactérias gram-positivas em superfícies através de luz ultravioleta pulsada," in Anais do II Congresso Brasileiro de Medicina Hospitalar. São Paulo: Editora Edgard Blücher

Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M. I., & Pizarro, R. (2001). Desinfección de agua. Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea, 1, 375-388.

Kahrs, R. F. (1995). Principios generales de la desinfección. Rev. sci. tech. Off. int. Epiz, 14(1), 143-163.

Mackenzie D. (2020). Ultraviolet Light Fights New Virus. Engineering (Beijing, China), 6(8), 851–853.

Martín, G. F., Romero, L. P., & Toro, M. V. R. (2020). Plan de cuidados estandarizados de infección por coronavirus (Covid-19). Enfermería Docente, 61-65.

ISSN en trámite

Meulemans, C.C.E. The basic principles of UV-sterilization of water. En: Ozone + Ultraviolet Water Treatment, Aquatec Amsterdam, 1986. Paris: International Ozone Association, 1986: B.1.1-B.1.13.

Rego, P., Vendrell, M. C., García, F. J., Gallardo, C. S., González, J. A., Gallego, A. R., & Rodríguez, L. A. (2002). Estudio de la cinética de muerte con tratamientos de ozono a microorganismos patógenos típicos de hortalizas. Alimentaria, (330), 125-128.

Tarrán, E. P. (2002). Desinfección por luz ultravioleta. Sao Paulo-Brasil: Tech Filter.

Unahalekhaka, A. (2011). Epidemiología de las infecciones asociadas a la atención en salud. Conceptos básicos de control de infecciones de IFIC, 29.

Wright, H., & Cairns, W. (1998, October). Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta. In Trabajo presentado en los Anales simposio OPS: Calidad de agua, Desinfección efectiva.

ISSN en trámite

Supervisión del sistema cardiovascular basado en observadores para sistemas con retardo

Odalis Barreto-Arenas * **Carlos-M. Astorga-Zaragoza** *
Felipe Ramírez-Rasgado * **Gerardo-V. Guerrero-Ramirez** *
Gloria-L. Osorio-Gordillo *

* *Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*

Abstract: En este artículo se presenta el desarrollo de un observador en cadena para la estimación de variables del sistema cardiovascular, el cual, debido a sus características, presenta retardos de medición en la señal de salida, y esto hace que los resultados se obtengan después de un determinado tiempo. El observador propuesto en este trabajo, es capaz de estimar el vector de estados libre de retardo considerando las coordenadas originales del sistema a diferencia de otros enfoques, para obtener la señal de salida sin retardo. La estructura del observador consta de dos subsistemas: el primero estima el vector de estado con retardo y por medio del segundo se logra estimar el vector de estado libre de retardo. El observador se aplica al sistema cardiovascular obteniendo la estimación del vector de estado libre de retardo incluso cuando este es alimentado con una señal con retardo de tiempo. El observador propuesto puede ser utilizado en investigaciones futuras para detectar anomalías en el sistema cardiovascular.

Keywords: modelos matemáticos; sistema cardiovascular; observadores; retardo.

1. INTRODUCIÓN

De acuerdo con la organización mundial de la salud OMS (2020), las enfermedades cardiovasculares ocupan el primer lugar como causas de muerte a nivel mundial. Pese a que se han realizado numerosas investigaciones, con el fin de prevenir dichas enfermedades, el área de oportunidad en este tema, aún es muy amplia. En el área de control se ha indagado particularmente en el diseño de controladores para dispositivos de asistencia ventricular y un número reducido de estas investigaciones se enfocan en el uso de observadores para la detección de anomalías cardíacas.

En lo que se refiere al modelado del sistema cardiovascular, se presenta en Wu et al. (2007) un modelo matemático presentado en espacio de estados. Se realiza la estimación de parámetros para implementar un observador adaptable que estima la presión aórtica, para llevar a efecto el control fisiológico mediante el rastreo de una señal de referencia, actualizada por una función no lineal. En de-los Reyes and Kappel (2010) se estudia la modificación y combinación de dos modelos cardiovasculares matemáticos existentes: un modelo global no pulsátil y un modelo de corazón izquierdo pulsátil simplificado. La finalidad es tener un modelo global agrupado que predice las presiones en la circulación sistémica, pulmonar y las presiones pulsátiles en las arterias de los dedos. En Astorga-Zaragoza (2019) se presenta un observador de estados de entradas desconocidas, para supervisar el sistema cardiovascular. Se utiliza el modelo windkessel, presentado en espacio de estados en forma singular. El observador, es capaz de estimar la distensibilidad arterial y el flujo sanguíneo a través de la inercia arterial total, a partir de la medición de la presión aórtica. Como resultado de esta investigación, se obtiene la estimación y detección de una falla, simulando una condición defectuosa en la apertura de la válvula aórtica. En Belkhatir et al. (2014) y Ledezma and Laleg-Kirati (2015) se presenta un modelo de parámetros agrupados, representado en espacio de estados en la forma no lineal. La detección de las anomalías se obtiene a partir de la generación de residuos mediante filtro de Kalman extendido. Se considera como variaciones; la apertura y cierre anormales de la válvula y algunas resistencias vasculares. En Simaan et al. (2008) se presenta un modelo matemático agrupado, representado en espacio de estados, con la finalidad de diseñar un controlador para un dispositivo de asistencia ventricular izquierda. El modelo matemático se basa en un circuito no lineal, el cual representa la interacción de la bomba con el ventrículo izquierdo. La variación en este circuito está dada por las fases de contracción, expulsión, relajación, y llenado del ventrículo izquierdo, representadas por un vector de ecuaciones diferenciales no lineales.

La estabilidad y el control de los sistemas con retardo de tiempo ha sido un tema de gran interés, debido a que el control de los sistemas de retardo de tiempo supone que

ISSN en trámite

todo el vector de estado está disponible para el control de retroalimentación. Sin embargo este supuesto no es generalmente cierto. En la práctica, es necesario diseñar observadores de estado, capaces de producir una estimación del vector de estado Trinh and Fernando (2011). Si la salida del sistema está disponible con retardo, se complica la supervisión del sistema. Los observadores diseñados para sistemas con retardo pueden ayudar a resolver esta problemática. Las investigaciones más destacadas para estimar los estados en presencia de salidas retardadas, incluyen el diseño de observadores de ganancia constante Subbarao and Muralidhar (2009).
En este trabajo se propone el diseño de un observador de estados para estimar las variables del sistema cardiovascular. A diferencia de los trabajos previos en los cuales no consideran los retardos inherentes a las señales de medición, en este trabajo se considera un caso más realista tomando en cuenta que las mediciones de la presión sistémica y la presión aórtica son medidas con retardos. El observador utilizado consta de dos subsistemas: el primero estima el vector de estado con retardo y por medio del segundo subsistema se logra una estimación sin retardo de los estados del sistema.

2. MODELO DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR

El modelo matemático de parámetros agrupados Windkessel, propuesto por Otto Frank en 1899 Belkhatir et al. (2014), describe las dinámicas del corazón, basándose en la analogía con un circuito eléctrico, en el cual, las variables de interés: presión y el flujo sanguíneo, están representados por el voltaje y la corriente, respectivamente. Las resistencias (R) representan la resistencia de las arterias al flujo sanguíneo, los condensadores (C) describen las propiedades elásticas (o de distensibilidad) de la pared arterial y los inductores (L) la inercia de la masa sanguínea. En la Tabla 1 se muestra la analogía entre los elementos de un circuito RLC y las variables que intervienen en las dinámicas del corazón, representados en el modelo matemático.

Table 1. Analogía

Circuitos eléctricos	Variables del Sistema Cardiovascular
Corriente $i(t)$	Flujo sanguíneo $i(t)$
Voltaje $V(t)$	Presión arterial $P_{ar}(t)$
Resistencia R	Resistencia en venas y arterias (Resistencia periférica total)R

Las dinámicas del corazón se pueden representar por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dP_s(t)}{dt} = -\frac{1}{RC}P_s(t) + \frac{1}{C}i(t) \tag{1}$$

$$i(t) = i_L(t) + \frac{L}{r}\frac{di_L(t)}{dt} \tag{2}$$

$$P_{\text{ar}}\,(t) = P_s(t) + r\,[i(t) - i_L(t)] \tag{3}$$

donde P_s es la presión sistémica, R es la resistencia periférica total, C es compliancia de la aorta, $i(t)$ es el flujo sanguíneo, L es la inercia en la sangre, r es la impedancia de la entrada de la aorta y P_{ar} es presión arterial (salida del sistema).

A partir de las Ecs. (1) a (3) es posible obtener la representación en espacio de estados, para esto se propone lo siguiente:

$$\begin{matrix} x_1 = P_s \\ x_2 = i_L \end{matrix} \quad \text{por lo tanto} \quad \begin{matrix} \dot{x}_1 = \dot{P}_s \\ \dot{x}_2 = \dot{i}_L \end{matrix} \tag{4}$$

donde la entrada del sistema será el flujo sanguíneo $i(t)$. Con lo anterior se puede obtener una representación de la siguiente forma.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_s \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ \frac{r}{L} \end{bmatrix} i(t)$$

$$P_{ar}(t) = \begin{bmatrix} 1 & -r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s \\ i_L \end{bmatrix} + ri(t) \tag{5}$$

El flujo sanguíneo es representado por la siguiente ecuación Serrano-Cruz et al. (2018).

$$i(t) = \left\{ \begin{matrix} I_0 sin^2\left(\frac{\pi t}{Ts}\right) & t \in [0, Ts\ ] \\ 0 & t \in [Ts,\ T] \end{matrix} \right\} \tag{6}$$

donde: t es el tiempo en segundos, Ts es el tiempo en sístole, T es el tiempo en diástole. En la Fig. 1 se muestra la señal de entrada del sistema $i(t)$.

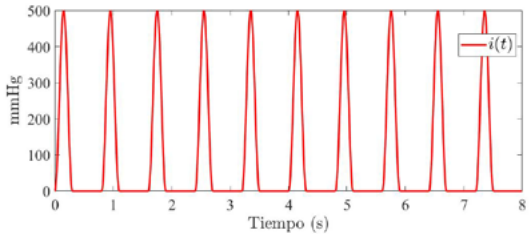


Fig. 1. Entrada del sistema (flujo sanguíneo) con $I_0 = 500ml, T_S = 0.3s, T = 0.8s$

Con esto, el sistema queda de la siguiente forma:

$$\begin{matrix} \dot{x}\,(t) = Ax\,(t) + Bu\,(t) \\ y\,(t) = Cx\,(t) + Du\,(t) \end{matrix} \tag{7}$$

Sin embargo, en la realidad el obtener la salida $y(t)$ en tiempo real de manera no invasiva es difícil puesto que hay un retardo de tiempo, debido al tiempo de propagación de la onda de presión del corazón, hasta que el flujo es detectado por el dispositivo de medición Sharir et al. (1993). Por lo tanto se representa el sistema con retardo

ISSN en trámite

de medición en la ecuación de la salida, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y_\tau(t) &= Cx(t-\tau) + Du(t-\tau) \end{aligned} \tag{8}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el estado del sistema, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es la entrada, $y_\tau(t) \in \mathbb{R}^p$ es la salida con retardo del sistema. Se define $\tau > 0$ como el valor de retardo conocido a la salida del sistema.

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR CON RETARDO

A continuación se presenta el diseño del observador para lograr la estimación del vector de estado del sistema (7). La principal ventaja de este observador es que logra la estimación del vector de estado libre de retardo incluso cuando este es alimentado por una señal con retardo. De igual forma, utiliza las coordenadas originales del sistema por lo que solo es necesario que se cumpla que el par (A, C) sea observable, evitando cambios de coordenadas o estructuras de sistemas con las cuales se deben de cumplir más restricciones, como en Astorga-Zaragoza (2019). Con esto se propone el siguiente observador en cadena:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_0(t) &= A\hat{x}_0(t) + Bu_0(t) + K(y_\tau(t) - \hat{y}_{\tau_0}(t)) \\ \dot{\hat{x}}_1(t) &= A\hat{x}_1(t) + Bu_1(t) + e^{A\tau}K(y_\tau(t) - \hat{y}_{\tau_0}(t)) \end{aligned} \tag{9}$$

donde $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ son los estados del observador, $u_0(t) = u(t-\tau)$ representa la entrada con retardo y $u_1(t) = u(t)$ es la entrada libre de retardo. Los subíndices $()_i$, $i = 0, 1$, representan el subsistema, es decir, $\hat{x}_0$ es la estimación del vector por medio de la base del observador e $i = 1$ es el ultimo subsistema de la cadena, el cual provee la estimación libre de retardo. La señal de salida del primer subsistema se denota como $\hat{y}_{\tau_0}(t)$. La ganancia K del observador asegura la convergencia si $A - KC$ es Hurwitz. Considerando esto se propone el siguiente teorema:

***Teorema** 1.* Considerando que el sistema (8) presenta un retardo conocido $\tau > 0$ y si el par $\{A, C\}$ es observable, entonces proponiendo cualquier polinomio de la forma:

$$\delta_n(s) = \upsilon_1 + \upsilon_2 s + \ldots + \upsilon s^{n-1} + s^n \tag{10}$$

con coeficientes reales $\upsilon_i, s \in \mathbb{C}$, existe una matriz $K \in \mathbb{R}^{n\times p}$ para cada subsistema del observador en cadena tal que $\delta_n(s)$ es un polinomio característico de la matriz $A_o = A - KC$, es decir, $\|(sI_n - A_o)\| = \delta_n(s)$.

Prueba del Teorema 1:
La estabilidad del observador propuesto en (9) se prueba en dos partes, primeramente se define el error de observación de la base de la cadena como $\tilde{x}_0 = x_0 - \hat{x}_0$, donde x_0 es el vector de estado del sistema con retardo, considerando esto el error queda de la siguiente forma:

$$\dot{\tilde{x}}_0 = (A - KC)\tilde{x}_0 = A_o\tilde{x}_0 \tag{11}$$

dado que el par $\{A, C\}$ es observable, la matriz A_o esta definido por la elección de la matriz L. Con esto se asegura la convergencia de la base de la cadena al estado con retardo x_0.

Ahora se procede a demostrar que el ultimo subsistema de la cascada convergerá al estado libre de retardo, para esto se define el error de observación como $\tilde{x}_1 = x - \hat{x}_1$, obteniendo lo siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= (A - KC)\tilde{x}_1 + e^{A\tau}\|\tilde{x}_0\| \\ \dot{\tilde{x}}_1 &\leq A_o\tilde{x}_1 + \bar{A}\|\tilde{x}_0\| \end{aligned} \tag{12}$$

donde $\|e^{A\tau}\| \leq \bar{A}$. Es importante resaltar que dado a que $\tilde{x}_0$ convergerá a cero, la convergencia solo dependerá de la matriz A_o de igual forma. Con esto se logrará la estimación del vector de estado libre de retardo.

4. APLICACIÓN AL SISTEMA CARDIOVASCULAR

A continuación se presenta la aplicación del observador en cadena con retardo de tiempo τ, para el sistema windkessel de cuatro elementos, representado por las siguientes ecuaciones en espacio de estados.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_s \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -\frac{r}{L} \end{bmatrix}}_{A} \begin{bmatrix} P_s \\ i_L \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ \frac{r}{L} \end{bmatrix}}_{B} i(t)$$

$$P_{ar\tau}(t) = \underbrace{[1 \;\; -r]}_{C} \begin{bmatrix} P_s(t-\tau) \\ i_L(t-\tau) \end{bmatrix} + \underbrace{r}_{D} i(t-\tau) \tag{13}$$

La entrada del sistema $i(t)$ está descrita en 6, $(t - \tau)$ representa el retardo de tiempo, donde $\tau > 0$.

La cadena de observadores que se emplean para la reconstrucción de los estados, se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_0(t) = &\begin{bmatrix} \frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & \frac{r}{L} \end{bmatrix} \hat{x}_0(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ \frac{r}{L} \end{bmatrix} u_0(t) \\ &+ \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \left(P_{ar\tau} - \hat{P}_{ar\tau_0} \right) \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1(t) = &\begin{bmatrix} \frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & \frac{r}{L} \end{bmatrix} \hat{x}_1(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ \frac{r}{L} \end{bmatrix} u_1(t) \\ &+ e^{A\tau} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \left(P_{ar\tau} - \hat{P}_{ar\tau_0} \right) \end{aligned} \tag{15}$$

Las señales estimadas por cada subsistema de la cadena se obtienen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{ar\tau_0} &= C\hat{x}_0(t) + Du_0(t) \\ \hat{P}_{ar\tau_1} &= C\hat{x}_1(t) + Du_1(t) \end{aligned} \tag{16}$$

Es importante el resaltar que la señal $\hat{P}_{ar\tau_0}(t)$ provee la estimación de la señal con retardo $P_{ar\tau}(t)$ que es la señal de salida conocida del sistema. Por otro lado, la señal $\hat{P}_{ar\tau_1}(t)$ provee la estimación de la señal libre de retardo $P_{ar}(t)$ que es completamente desconocida por el observador. La ganancia K del observador se calcula de acuerdo al Teorema 1.

ISSN en trámite

5. RESULTADOS

Se valida el desempeño del observador con retardo de tiempo, para el sistema windkessel de cuatro elementos. La salida del sistema está disponible, sin embargo existen dos estados no medibles: la presión sistémica y el flujo aórtico, se utilizan los parámetros humanos normales mostrados en la Tabla 2 (Hlaváč and Holčík, 2004).

Table 2. Parámetros humanos normales

Parámetro	Unidades	Valor
Resistencia periferica total (R)	$[mmHg.s.cm^{-3}]$	1
Compliancia de la aorta (C)	$[cm^3 mmHg^{-1} s^2 cm^{-3}]$	1
Resistencia de la impedancia en entrada de la aorta (r)	$[mmHg.s.cm^{-3}]$	0.05
Inercia en la sangre (L)	$[mmHg.s^2.cm^{-3}]$	0.005

Los polos del observador son elegidos como $\upsilon = [-8, \ -12]$ lo que da como resultado la siguiente matriz K:

$$K = \begin{bmatrix} 31.7358 \\ 476.8952 \end{bmatrix} \tag{17}$$

Es importante el resaltar que esta matriz K es utilizada en ambos subsistemas de la cadena. Las condiciones iniciales para el sistema y el observador son:

$$x(0) = \begin{bmatrix} 75 \\ 50 \end{bmatrix}, \hat{x}_i(\tau) = \begin{bmatrix} 100 \\ 200 \end{bmatrix}, i = 1, 2 \tag{18}$$

5.1 Caso 1: Retardo de $\tau = 0.1s$

En el primer caso se considera un retardo de tiempo $\tau = 0.1s$. En las Figs. 2-4 se muestra la estimación por medio del observador de la presión sistémica (estado 1), flujo aórtico (estado 2) y presión arterial (salida). En la estimación del estado 1, mostrado en la Fig. 2, así como en la estimación del estado 2, mostrado en la Fig. 3, se muestra la convergencia del observador, lo cual indica que hubo una compensación en el retardo del sistema. En la Fig. 4 se muestra la salida retardada del sistema y el observador con retardo de tiempo.

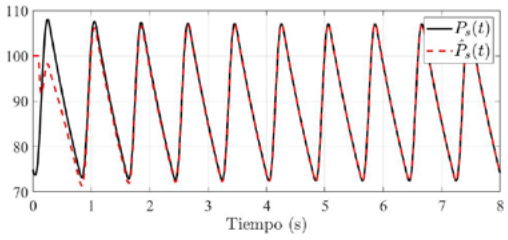


Fig. 2. Estimación de la presión sistémica $Pa(t)$ con $\tau = 0.1s$ por medio del ultimo subsistema de la cadena

5.2 Caso 2: Retardo de $\tau = 0.5s$

En el segundo caso se considera un retardo de tiempo $\tau = 0.5s$. En las Figs. 5-7 se muestra la estimación por medio del observador de la presión sistémica (estado 1), flujo aórtico (estado 2) y presión arterial (salida), respectivamente, con un retardo de tiempo de $\tau = 0.5$. En la Fig. 5 se obtiene la presión sistémica y se observa que el observador converge al sistema después del segundo 3, mientras que en el caso 1, el observador converge antes del segundo 2, lo cual indica que con un retardo de tiempo mayor, el observador tardará más en converger al sistema. Lo mismo ocurre en la estimación del estado 2 como se presenta en la Fig. 6, en este caso, la estimación del flujo aórtico también se ve afectada por el retardo, teniendo un tiempo de convergencia mayor que en el caso 1.
En la Fig. 7 se muestra el retardo de 0.5s en el sistema, así como el sistema retardado y el observador, en esta figura es más evidente la diferencia que hay en el retardo de tiempo con respecto al caso 1, así también se demuestra la diferencia de tiempo en la convergencia del observador en la obtención de la salida del sistema.

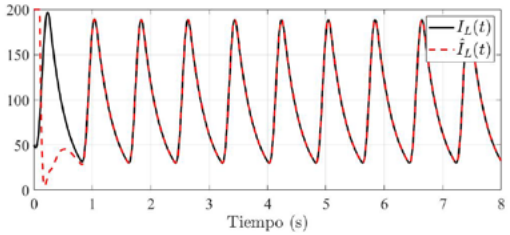


Fig. 3. Estimación del flujo aórtico $I_L(t)$ con $\tau = 0.1s$ por medio del ultimo subsistema de la cadena

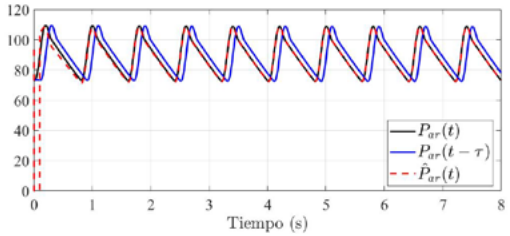


Fig. 4. Estimación de la presión arterial P_{ar} con $\tau = 0.1s$ por medio del ultimo subsistema de la cadena

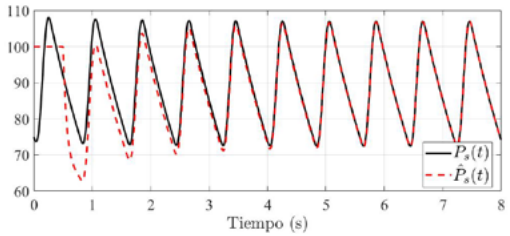


Fig. 5. Estimación de presión sistémica $P_s(t)$ con $\tau = 0.5s$ por medio del ultimo subsistema de la cadena

ISSN en trámite

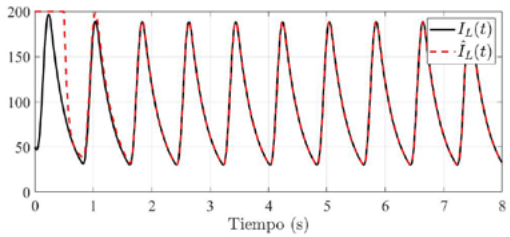


Fig. 6. Estimación del flujo aórtico $I_L(t)$ con $\tau = 0.5s$ por medio del ultimo subsistema de la cadena

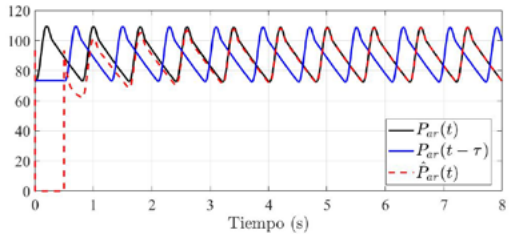


Fig. 7. Estimación de la presión arterial $P_{ar}(t)$ con $\tau = 0.5s$ por medio del ultimo subsistema de la cadena

6. CONCLUSIÓN

Se presentó la implementación de un observador en cadena con retardo de tiempo, para el sistema windkessel de cuatro elementos, con el propósito de estimar los estados 1 y 2 del sistema, compensando el tiempo natural de retardo del sistema cardiovascular. Se llevaron a cabo dos casos de estudio: el primero con un retardo de 0.1 s y el segundo con un retardo de 0.5 s. Con esto se pudo comprobar la convergencia del observador con retardo para la reconstrucción de los estados en tiempo real.

REFERENCES

Astorga-Zaragoza, C.M. (2019). Observer-based monitoring of the cardiovascular system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(3), 501–505.

Belkhatir, Z., Laleg-Kirati, T.M., and Tadjine, M. (2014). Residual generator for cardiovascular anomalies detection. In *2014 European Control Conference (ECC)*, 1862–1868. IEEE.

de-los Reyes, A. and Kappel, F. (2010). Modeling pulsatility in the human cardiovascular system.

Hlaváč, M. and Holčík, J. (2004). Windkessel model analysis in matlab. In *Proceedings of 10th conference STUDENT EEICT*, 3, 5.

Ledezma, F.D. and Laleg-Kirati, T.M. (2015). A first approach on fault detection and isolation for cardiovascular anomalies detection. In *2015 American Control Conference (ACC)*, 5788–5793. IEEE.

OMS (2020). Organización mundial de la salud. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death.

Serrano-Cruz, D.A., Astorga-Zaragoza, C.M., Guerrero-Ramírez, G.V., García-Beltran, C.D., Osorio-Gordillo, G.L., and Ortiz-Rangel, E. (2018). Estimación de variables del sistema cardiovascular mediante un observador para sistemas singulares. In *Proc. Congreso Nacional de Control Automático AMCA*, 108–113.

Sharir, T., Marmor, A., Ting, C.T., Chen, J.W., Liu, C.P., Chang, M.S., Yin, F., and Kass, D.A. (1993). Validation of a method for noninvasive measurement of central arterial pressure. *Hypertension*, 21(1), 74–82.

Simaan, M.A., Ferreira, A., Chen, S., Antaki, J.F., and Galati, D.G. (2008). A dynamical state space representation and performance analysis of a feedback-controlled rotary left ventricular assist device. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(1), 15–28.

Subbarao, K. and Muralidhar, P. (2009). State observer for linear systems with piece-wise constant output delays. *IET control theory & applications*, 3(8), 1017–1022.

Trinh, H. and Fernando, T. (2011). *Functional observers for dynamical systems*, volume 420. Springer Science & Business Media.

Wu, Y., Allaire, P.E., Tao, G., and Olsen, D. (2007). Modeling, estimation, and control of human circulatory system with a left ventricular assist device. *IEEE transactions on control systems technology*, 15(4), 754–767.

ISSN en trámite

Diseño e Implementación en Hardware Embebido de Integradores de Orden Fraccionario

Eduardo Reyes-Coeto * **Jesús Manuel Muñoz-Pacheco** *
Luz del Carmen Gómez-Pavón *

* *Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue 72570 MX (e-mail: eduardo.reyesc@alumno.buap.mx, jesusm.pacheco@correo.buap.mx, luz.gomez@correo.buap.mx).*

Resumen: En este documento se describe el diseño e implementación de un integrador de orden fraccionario utilizando matrices analógicas configurables en campo (F.P.A.A.), estos dispositivos son procesadores de señales analógicas basados en la tecnología de capacitor-conmutado y capaces de ser reconfigurados eléctricamente en tiempo real, lo cual reduce significativamente el tiempo de implementación. Debido a que no existe una implementación directa para el operador de integración $H(s) = \frac{1}{s^{\alpha}}$ en el dominio de s, se utiliza una aproximación de primer orden obtenida a través del método de expansión de fracciones continuas (C.F.E.) para implementar el integrador. Finalmente se caracteriza la respuesta en frecuencia del integrador de O.F. y se verifica que la pendiente generada corresponda a -20α [dB/dec].

Palabras clave: cálculo, orden, fraccionario, integrador, F.P.A.A., aproximación, C.F.E.

1. INTRODUCCIÓN

En el cálculo clásico el símbolo $(d/dx)^n f(x)$, $n = 0, 1, 2, ...$ denota derivadas de orden entero. En el cálculo de orden fraccionario los símbolos $(d/dx)^{-\alpha} f(x)$ y $(d/dx)^{\alpha} f(x)$, con $(Re)\alpha > 0$, denotan los operadores fraccionarios de integral y derivada respectivamente, donde α ahora es extendida al conjunto de números reales y complejos. El cálculo de orden fraccionario constante (C.O.F.C.) es una rama de las matemáticas emergida del cálculo tradicional de orden entero, esta es tan antigua como el mismo cálculo clásico, su origen se remonta al final del siglo XVII donde a través de una serie de cartas escritas entre los matemáticos Leibniz y L´Hôpital se discute el significado y la interpretación del operador de derivada cuando α es un número fraccionario. Muchos grandes matemáticos contribuyeron después al desarrollo de definiciones para operadores fraccionarios, como Caputo, Abel, Weyl, Riesz, Riemann, Liouville, Grünwald, Letnikov, entre otros, ver Diethelm (2010); Das (2011).
Los operadores de orden fraccionario (O.F.) han despertado un gran interés entre la comunidad científica, debido a que sus propiedades permiten modelar sistemas con mayor precisión. Numerosas aplicaciones han sido desarrolladas en diferentes campos como: biología Bodo et al. (2017); Zambrano-Serrano et al. (2018), ingeniería biomédica Magin (2004), economía Tacha et al. (2018), sistemas no lineales Zambrano-Serrano et al. (2017), criptografía Jahanshahi et al. (2020); Montero-Canela et al. (2020), entre muchos otros. Su implementación puede realizarse utilizando dispositivos analógicos o digitales, en el caso digital la exactitud obtenida depende del método numérico o aproximación para resolver la integral o derivada de O.F., lo cual puede requerir potentes sistemas de procesamiento, por ejemplo, Tolba et al. (2019). En el caso analógico, la implementación de operadores fraccionarios se basa en la síntesis de *fractancias*, las cuales son elementos eléctricos con impedancias de O.F., estas pueden ser implementadas con elementos pasivos en redes RC o RL, ver Kartci et al. (2019) y activos, basados en topologías con amplificadores operacionales, ver Munoz-Pacheco et al. (2021).
Particularmente, en la implementación de los operadores de orden fraccionario con elementos analógicos existen interesantes aplicaciones, por ejemplo, en Podlubny et al. (2002) se implementa un controlador integral de orden fraccionario I^{λ}, en Bohannan (2008) un controlador proporcional-integral PI^{λ}, en Charef (2006); Swain et al. (2017); Dastjerdi et al. (2019) se implementan controladores $PI^{\lambda}D^{\mu}$, donde λ, $\mu \in \mathbb{R}^{+}$, en Muresan et al. (2021) se resumen diferentes aplicaciones en sensores y técnicas de filtrado, en Maundy et al. (2010) se implementan capacitores de impedancia fraccionaria para realizar un multivibrador electrónico. A pesar de las ventajas que ofrecen los operadores de orden fraccionario en diversas aplicaciones, su implementación analógica ha sido

ISSN en trámite

limitada por diversos factores, principalmente que los valores de los elementos electrónicos no son los valores estándar producidos comercialmente, las tolerancias son muy grandes además de que estos elementos están susceptibles a alteraciones externas y otros efectos producidos al conectar un número considerable de elementos, lo que produce errores. En este documento se describe la implementación de un integrador de O.F. utilizando matrices analógicas programables en campo (F.P.A.A.), estos dispositivos son procesadores de señales analógicas basados en la tecnología de capacitor-conmutado y capaces de ser reconfigurados eléctricamente en tiempo real, sus características permiten realizar una implementación rápida del integrador de O.F., reconfigurar dinámicamente los parámetros de los bloques analógicos y reducir considerablemente los problemas que conllevan los elementos discretos al poder implementar un sistema analógico dentro de un solo chip. El resto de este documento está organizado como se describe a continuación. En la sección 2 se describen los aspectos teóricos más importantes para el integrador de O.F., en la sección 3 se describe el proceso de diseño e implementación, en la sección 4 se presentan los resultados obtenidos y su discusión, y en la sección 5 las conclusiones sobre el trabajo realizado.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

En esta sección son descritas algunas de las propiedades más importantes para el operador integral de O.F.

2.1 Definición de Riemann-Liouville Para el Operador Integral de O.F.

$$ {}_aD_t^{-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t (t-\tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau \tag{1}$$

Donde $0 < \alpha \leq 1$, $\Gamma(\cdot)$ es la función Gama, τ es una variable ficticia y $[a, t]$ es el intervalo de operación, ver Podlubny (1998).

2.2 Operador de Orden Fraccionario de Laplace y Función de Transferencia

La transformada de Laplace con condiciones iniciales iguales a cero de la definición de la integral de O.F. de Riemann-Liouville de la ecuación 1 está dada por:

$$ \mathcal{L}\{{}_0D_t^{-\alpha} f(t)\} = s^{-\alpha} F(s) \tag{2}$$

Donde $F(s)$ denota la transformada de Laplace de $f(t)$, y $s^{-\alpha}$ es el operador de integral de orden fraccionario de Laplace, ver Podlubny (1998). Debido a que la transformada de Laplace es un operador lineal, puede ser aplicada a una ecuación diferencial de orden fraccionario con coeficientes a_k, b_k y señales de entrada $x(t)$ y salida $y(t)$ para obtener la función de transferencia:

$$ H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^{\beta m} + b_{m-1} s^{\beta m-1} + \ldots + b_0 s^{\beta_0}}{a_n s^{\alpha n} + a_{n-1} s^{\alpha n-1} + \ldots + a_0 s^{\alpha_0}} \tag{3}$$

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se describe el proceso de diseño del integrador de O.F., para el cual se utiliza una aproximación al operador $\frac{1}{s^\alpha}$ posteriormente esta aproximación es sintetizada analógicamente utilizando F.P.A.A., también su respuesta en frecuencia es caracterizada y se mide que la pendiente corresponda a -20α [dB/dec].

3.1 Aproximación al operador $\frac{1}{s^\alpha}$

El operador de integración fraccionaria constante en el dominio de Laplace se define por la función de transferencia $H(s) = \frac{1}{s^\alpha}$ con $\alpha \in (0, 1)$, este operador no puede ser traducido directamente a una implementación física, por lo que es necesario recurrir a aproximaciones. A lo largo de las últimas décadas diferente autores han propuesto métodos de aproximación, los cuales mediante funciones racionales de orden entero aproximan su comportamiento al de un operador fraccionario, algunos de ellos son: Oustaloup et al. (2000); Carlson and Halijak (1964); Matsuda and Fujii (1993); Krishna (2011). Particularmente en Krishna (2011) se describe el método de expansión de fracciones continuas (C.F.E), el cual se eligió utilizar en este trabajo para implementarlo físicamente debido a que este método permite una aproximación racional que se ajusta mejor a $H(s) = 1/s^\alpha$ en el dominio de s. Para el caso del operador integral, la aproximación de primer orden con $\alpha \in (0, 1)$ es:

$$ \frac{1}{s^\alpha} \approx \frac{(1-\alpha)s + (1+\alpha)}{(1+\alpha)s + (1-\alpha)} = \frac{As+1}{s+A}, \quad donde \quad A = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \tag{4}$$

Esta aproximación ha sido validada en diferentes implementaciones analógicas de operadores fraccionarios con dispositivos activos y pasivos, ver Munoz-Pacheco et al. (2021); Podlubny et al. (2002); Tlelo-Cuautle et al. (2020). La aproximación de la ecuación 4 tiene un rango de frecuencia de operación muy bajo, aproximadamente 10^{-1} rads/s a 10^1 rads/s. Por este motivo, se le aplicó un escalamiento en frecuencia con un factor $k_f = 1/2\pi 1000$ como se presenta en la ecuación 5:

$$ \frac{1}{k_f s^\alpha} \approx \frac{k_f A s}{k_f s + A} \tag{5}$$

Esta aproximación puede ser reescrita como la suma de dos expresiones racionales, las cuales al analizarlas podemos interpretarlas como las funciones de transferencia de un filtro paso-alto y paso-bajo, las que denominaremos $T_{HP}(s)$ y $T_{LP}(s)$ respectivamente. Estas expresiones se muestran en la ecuación 6 y en la figura 1 son representadas en un diagrama de bloques

$$ \begin{aligned} \frac{k_f A s + 1}{k_f s + A} &= \underbrace{\frac{k_f A s}{k_f s + A}}_{FiltroPA} + \underbrace{\frac{1}{k_f s + A}}_{FiltroPB} \\ &= T_{HP}(s) + T_{LP}(s) \end{aligned} \tag{6}$$

ISSN en trámite

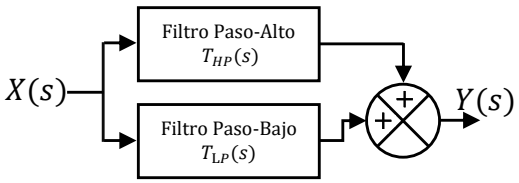
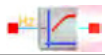
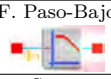


Fig. 1. Diagrama de bloques de integrador de O.F. implementado con filtro paso-alto y paso-bajo

3.2 Síntesis en F.P.A.A. del Operador $\frac{1}{s^\alpha}$

La síntesis analógica del integrador de O.F. de la figura 1 se realizó utilizando la tarjeta de desarrollo *Anadigm QuadApex*, fabricada por la empresa *Anadigm*, esta tarjeta incorpora 4 dispositivos F.P.A.A. de matrícula *AN231E04*, ver Anadigm (2021b,a). El diseño analógico se realizó en el software *AnadigmDesigner2* (A.D.2) utilizando módulos analógicos configurables (C.A.M).
El bloque encargado de realizar la suma de la señal proveniente de los filtros paso-alto y paso-bajo es un C.A.M. de suma invertida, este bloque tiene una etapa de ganancia invertida en cada una de sus entradas, su función de transferencia e icono se presentan en la tabla 1. El C.A.M. filtro bilineal es un bloque que puede ser configurado como filtro paso-bajo o paso-alto, requiriendo en ambos casos el valor de ganancia G y la frecuencia de corte f_0. En la tabla 1 se presenta su símbolo en el software *AnadigmDesigner2* tanto para la configuración como filtro paso-alto como paso-bajo, la función de transferencia en cada caso y los valores de configuración de: ganancia G_{HP} y frecuencia de corte $f_{0_{HP}}$ para el filtro paso-alto, y ganancia G_{LP} y frecuencia de corte $f_{0_{LP}}$ para el filtro paso-bajo. Los valores de configuración, mostrados en la tercera columna de la tabla 1, fueron obtenidos al establecer igualdades entre las funciones de transferencia $H_{HP}(s)$ y $H_{LP}(s)$, presentadas en la segunda columna de tabla 1, con las funciones de transferencia $T_{HP}(s)$ y $T_{LP}(s)$ de la ecuación 6

Tabla 1. Configuración de módulos C.A.M.

F. Paso-Alto	F.T.	Valores Configuración
	$H_{HP}(s) = -\frac{Gs}{s+2\pi f_0}$	$G_{HP} = A$ $f_{0_{HP}} = A/k_f 2\pi$
F. Paso-Bajo	F.T.	Valores Configuración
	$H_{LP}(s) = \pm\frac{2\pi f_0 G}{s+2\pi f_0}$	$G_{LP} = 1/k_f 2\pi f_0$ $f_{0_{LP}} = A/k_f 2\pi$
Suma	Función de Transferencia	
	$V_{out} = -G_1 V_{input1} - G_2 V_{input2}$	

Utilizando la ecuación 4 para calcular A y las ecuaciones de la columna 3 de la tabla 1, se obtuvieron los valores de configuración para implementar el integrador de O.F. con la estructura de filtro paso-bajo y paso-alto en los órdenes fraccionarios $\alpha = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95]$, estos valores obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de configuración para filtro bilinear paso-bajo y paso-alto, para implementar un integrador de O.F.

O.F.	Filtro paso-bajo		Filtro paso-alto	
α	$f_{0_{LP}}[kHz]$	G_{LP}	$f_{0_{HP}}[kHz]$	G_{HP}
0.1	0.818182	1.22222	0.818182	0.818182
0.2	0.666667	1.5	0.666667	0.666667
0.3	0.538462	1.85714	0.538462	0.538462
0.4	0.428571	2.33333	0.428571	0.428571
0.5	0.333333	3	0.333333	0.333333
0.6	0.25	4	0.25	0.25
0.7	0.176471	5.66667	0.176471	0.176471
0.8	0.111111	9	0.111111	0.111111
0.85	0.0810811	12.3333	0.0810811	0.0810811
0.9	0.0526316	19	0.0526316	0.0526316
0.95	0.025641	39	0.025641	0.025641

Metodología Utilizada Para la Caracterización: Utilizando el dispositivo NI Elvis II se capturó el diagrama de Bode del integrador de O.F. configurado en cada orden fraccionario, en el rango de frecuencia de $100Hz$ a $10kHz$. La señal de estímulo a la entrada del integrador se configuró con un valor de $0.1V$ de amplitud pico. El cálculo de la pendiente en el diagrama de magnitud de Bode se realizó a partir de dos puntos: $P_1(f_1, G_1)$ y $P_2(f_2, G_2)$, en los cuales: $f_{1,2}$ es la frecuencia y $G_{1,2}$ la magnitud. De acuerdo con Perdikaris (1991), la pendiente se puede calcular a partir de dos puntos utilizando la formula:

$$Pendiente = \frac{G_2 - G_1}{\Delta dec}, \quad donde \quad \Delta dec = \log_{10}\left(\frac{f_2}{f_1}\right) \tag{7}$$

La determinación de los puntos se realizó con el siguiente procedimiento. Tomando como referencia la ganancia máxima, medida en decibelios, se estableció un punto a $-3dB$ y a partir de ahí se estableció un segundo punto separado una década en frecuencia a la derecha. Posteriormente se procedió a calcular la pendiente entre ambos puntos y su error con respecto al caso ideal, que corresponde a -20α [dB/dec].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 3 se presenta una comparación entre la pendiente ideal y la pendiente obtenida experimentalmente en cada orden fraccionario. En la tercera columna se presenta el valor calculado de A con la ecuación 4, en la quinta columna se muestra el error absoluto calculado entre ambas pendientes. La aproximación de primer orden al integrador de O.F. utilizada conlleva un error inherente, el cual se ve reflejado en la tabla, este error en la pendiente puede ser reducido utilizando aproximaciones de órdenes superiores; sin embargo, esto implica el uso de mayores recursos de hardware. También se puede observar como la pendiente obtenida experimentalmente para el orden fraccionario $\alpha = 0.3$ tiene un error de aproximadamente $2\,[dB/dec]$ con respecto al valor ideal esperado de $6\,[dB/dec]$; sin embargo, en comparación a la pendiente ideal obtenida para un integrador de orden

ISSN en trámite

Tabla 3. Tabla comparativa de la pendiente ideal vs obtenida experimentalmente.

Integrador ideal		Integrador implementado en F.P.A.A.		
Orden α	Pendiente [dB/dec]	A	Pendiente [dB/dec]	Error absoluto [dB/dec]
0.1	-2	0.8182	-2.58187568	0.5818757
0.2	-4	0.6667	-5.449585532	1.4495855
0.3	-6	0.5385	-8.063733095	2.0637331
0.4	-8	0.4286	-10.47566313	2.4756631
0.5	-10	0.3333	-12.48352962	2.4835296
0.6	-12	0.2500	-14.25995935	2.2599594
0.7	-14	0.1765	-15.57897503	1.578975
0.8	-16	0.1111	-16.34209048	0.3420905
0.85	-17	0.0811	-16.62003788	-0.379962
0.9	-18	0.0526	-16.92450617	-1.075494
0.95	-19	0.0256	-18.49468315	-0.505317

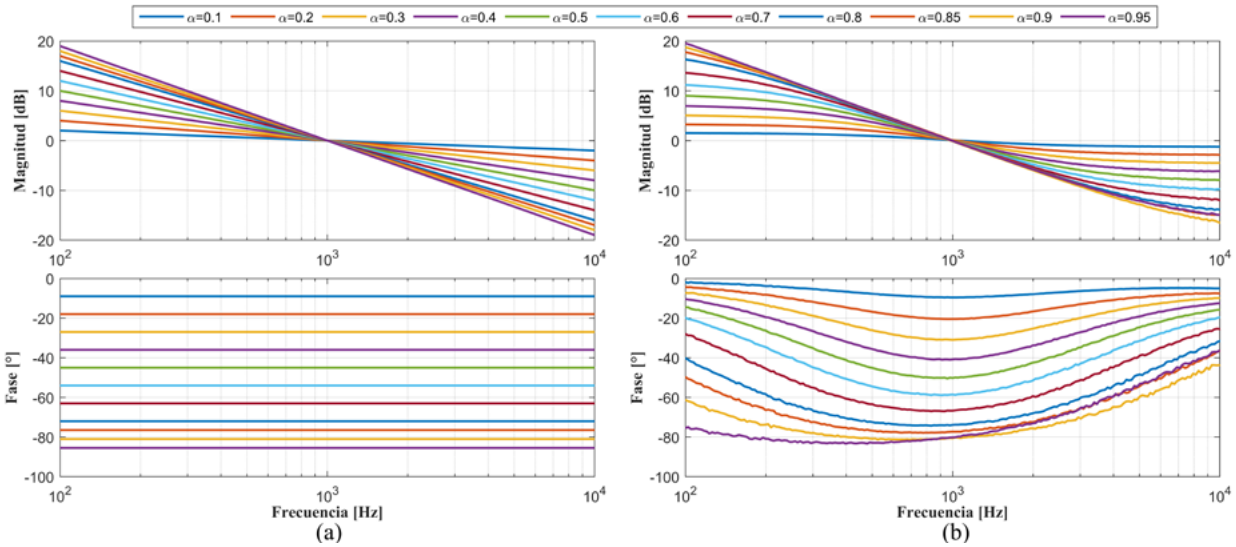


Fig. 2. Diagramas de Bode de la respuesta en frecuencia del integrador de O.F. (a) Caso ideal graficado mediante la función de Matlab FOMCON. (b) Resultado experimental obtenido a través del dispositivo NI Elvis II.

$\alpha = 0.4$ el error es mínimo. Esta peculiaridad se repite en los órdenes fraccionarios posteriores, lo que nos permite suponer que un ajuste en el valor de A y los valores de configuración puede ser una segunda opción para mejorar considerablemente el resultado obtenido.

Los datos de los diagramas de Bode obtenidos con el dispositivo NI Elvis II se exportaron mediante un archivo delimitado por comas (*C.S.V.*) y estos se graficaron utilizando el *software* Matlab, como se muestra en la figura 2(b). Utilizando la función FOMCON, ver Tepljakov (2017), se graficaron los diagramas de Bode ideales del integrador en cada orden fraccionario, estos se presentan en la gráfica de la figura 2(a). En la figura 2(b) se observa como alrededor de $1kHz$ la pendiente experimental se asemeja a la pendiente ideal en un rango de frecuencia determinado, este rango de frecuencia aumenta en proporción al orden fraccionario. Esto también sucede en la fase, a excepción de los ordenes fraccionarios $\alpha = 0.9, 0.95$, dónde se observa una variación en el comportamiento en comparación al patrón que llevan las lineas anteriores.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el diseño, implementación y prueba de un integrador de O.F., utilizando dispositivos reconfigurables F.P.A.A., los cuales presentan grandes ventajas en la síntesis analógica, así como la reducción de problemas que conllevan los elementos analógicos. El integrador desarrollado tiene un amplio campo de aplicaciones, por ejemplo, en las áreas de control y procesamiento de señales. Este diseño basado en la aproximación de primer orden del método C.F.E. presenta una gran versatilidad en su implementación, además que cubre el rango de ordenes fraccionarios entre 0 y 1. Como se muestra en la tabla 3, las pendientes medidas presentan errores con respecto al caso ideal por lo que en un trabajo futuro se puede realizar la optimización del diseño para reducir el error presentado en la pendiente y que esta se aproxime al caso ideal -20α [dB/dec].

ISSN en trámite

REFERENCIAS

Anadigm, I. (2021a). An231e04 datasheet rev 1.5, 3rd generation dynamically reconfigurable dpasp.

Anadigm, I. (2021b). Anadigm fpaa. https://www.anadigm.com/index.asp.

Bodo, B., Mvogo, A., and Morfu, S. (2017). Fractional dynamical behavior of electrical activity in a model of pancreatic β-cells. *Chaos, Solitons & Fractals*, 102, 426–432.

Bohannan, G.W. (2008). Analog fractional order controller in temperature and motor control applications. *Journal of Vibration and Control*, 14(9-10), 1487–1498.

Carlson, G. and Halijak, C. (1964). Approximation of fractional capacitors (1/s)ˆ(1/n) by a regular newton process. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 11(2), 210–213.

Charef, A. (2006). Analogue realisation of fractional-order integrator, differentiator and fractional piλdμ controller. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 153(6), 714–720.

Das, S. (2011). *Functional fractional calculus*, volume 1. Springer.

Dastjerdi, A.A., Vinagre, B.M., Chen, Y., and HosseinNia, S.H. (2019). Linear fractional order controllers; a survey in the frequency domain. *Annual Reviews in Control*, 47, 51–70.

Diethelm, K. (2010). *The analysis of fractional differential equations: An application-oriented exposition using differential operators of Caputo type*. Springer Science & Business Media.

Jahanshahi, H., Yousefpour, A., Munoz-Pacheco, J.M., Kacar, S., Pham, V.T., and Alsaadi, F.E. (2020). A new fractional-order hyperchaotic memristor oscillator: Dynamic analysis, robust adaptive synchronization, and its application to voice encryption. *Applied Mathematics and Computation*, 383, 125310.

Kartci, A., Agambayev, A., Farhat, M., Herencsar, N., Brancik, L., Bagci, H., and Salama, K.N. (2019). Synthesis and optimization of fractional-order elements using a genetic algorithm. *IEEE Access*, 7, 80233–80246.

Krishna, B.T. (2011). Studies on fractional order differentiators and integrators: A survey. *Signal processing*, 91(3), 386–426.

Magin, R. (2004). Fractional calculus in bioengineering, part 1. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering*, 32(1).

Matsuda, K. and Fujii, H. (1993). H (infinity) optimized wave-absorbing control-analytical and experimental results. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 16(6), 1146–1153.

Maundy, B., Elwakil, A., and Gift, S. (2010). On a multivibrator that employs a fractional capacitor. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 62(1), 99–103.

Montero-Canela, R., Zambrano-Serrano, E., Tamariz-Flores, E.I., Muñoz-Pacheco, J.M., and Torrealba-Meléndez, R. (2020). Fractional chaos based-cryptosystem for generating encryption keys in ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 97, 102005.

Munoz-Pacheco, J.M., Lujano-Hernández, L.C., Muñiz-Montero, C., Akgül, A., Sánchez-Gaspariano, L.A., Li, C.B., and Çağri Kutlu, M. (2021). Active realization of fractional-order integrators and their application in multiscroll chaotic systems. *Complexity*, 2021.

Muresan, C.I., Birs, I.R., Dulf, E.H., Copot, D., and Miclea, L. (2021). A review of recent advances in fractional-order sensing and filtering techniques. *Sensors*, 21(17), 5920.

Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., and Nanot, F.M. (2000). Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 47(1), 25–39.

Perdikaris, G.A. (1991). Computer controlled systems. In *Computer Controlled Systems*, 322–391. Springer.

Podlubny, I. (1998). *Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications*. Elsevier.

Podlubny, I., Petráš, I., Vinagre, B.M., O'leary, P., and Dorčák, L. (2002). Analogue realizations of fractional-order controllers. *Nonlinear dynamics*, 29(1), 281–296.

Swain, S.K., Sain, D., Mishra, S.K., and Ghosh, S. (2017). Real time implementation of fractional order pid controllers for a magnetic levitation plant. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 78, 141–156.

Tacha, O., Munoz-Pacheco, J., Zambrano-Serrano, E., Stouboulos, I., and Pham, V.T. (2018). Determining the chaotic behavior in a fractional-order finance system with negative parameters. *Nonlinear Dynamics*, 94(2), 1303–1317.

Tepljakov, A. (2017). Fomcon: fractional-order modeling and control toolbox. In *Fractional-order modeling and control of dynamic systems*, 107–129. Springer.

Tlelo-Cuautle, E., Pano-Azucena, A.D., Guillén-Fernández, O., and Silva-Juárez, A. (2020). *Analog/digital implementation of fractional order chaotic circuits and applications*. Springer.

Tolba, M.F., AboAlNaga, B.M., Said, L.A., Madian, A.H., and Radwan, A.G. (2019). Fractional order integrator/differentiator: Fpga implementation and fopid controller application. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 98, 220–229.

Zambrano-Serrano, E., Muñoz-Pacheco, J., and Campos-Cantón, E. (2017). Chaos generation in fractional-order switched systems and its digital implementation. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 79, 43–52.

Zambrano-Serrano, E., Muñoz-Pacheco, J., Gómez-Pavón, L., Luis-Ramos, A., and Chen, G. (2018). Synchronization in a fractional-order model of pancreatic β-cells. *The European Physical Journal Special Topics*, 227(7), 907–919.

ISSN en trámite

Sistema de automatización de control de acceso vehicular para un relleno sanitario intermunicipal

Garcia Soto J. P.[1], Sánchez Coronado E.M.[*2], Cid Pimentel D.[1], Palestino Hernandez E. A[1].

[1]Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Av. Universidad No. 350 Carr. Fed. Cuitláhuac - La Tinaja Localidad Dos Caminos, Cuitláhuac, Veracruz, México.

[2]Programa Educativo de Mecatrónica Área Automatización, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Av. Universidad No. 350 Carr. Fed. Cuitláhuac - La Tinaja Localidad Dos Caminos, Cuitláhuac, Veracruz, México.

[*]Autor para correspondencia: eduardo.sanchez@utcv.edu.mx

Abstract: En el presente artículo se muestra el resultado del desarrollo de un sistema de automatización para el control de acceso vehicular aplicado a la industria de separación y reciclaje de residuos sólidos, el sistema cuenta con un sistema informático capaz de registrar la información generada en campo, la información puede ser consultada de manera remota a través de internet, así mismo, el sistema integra componentes electrónicos, mecánicos y programables que permiten ejecutar las tareas atendiendo las necesidades particulares de la empresa.

Palabras clave: Automatización industrial, Interfaz, Computación, Programación, Base de datos.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de sistemas de control de acceso vehicular son utilizadas para reservar la entrada de personas específicas hacia las instalaciones internas de distintas organizaciones [1], así mismo se requiere un sistema de identificación y registro para garantizar la seguridad interna de la misma, esto último puede realizarse desde una forma manual realizada por un operador humano o bien, de forma autónoma por el solicitante del acceso o salida utilizando alguna tecnología de comunicación para una operación sin supervisión [2]. En esencia, la detección de objetos es una tarea utilizada para diversos procesos industriales, estos involucran métodos y elementos capaces de determinar la presencia/ausencia de un determinado objeto en un espacio físico [3]. Durante el diseño de sistemas de acceso y restricción basados en barreras físicas involucran la consideración de las características técnicas [4], tal como eléctricas, mecánicas y de programación, todas ellas acordes a las necesidades particulares de las organizaciones. Específicamente, muchos rellenos sanitarios no cuentan con un sistema automático para el control de acceso vehicular, además, los registros se basan en notas realizadas en papel y bitácoras, en consecuencia se debe asignar una cantidad considerable de papel. Si bien actualmente existen sistemas para el control de acceso vehicular, en la mayoría de las veces no se encuentran particularizados a las necesidades específicas que presenta un relleno sanitario, como lo son la administración de la información de los vehículos, la cantidad de residuos recibida y los importes totales en determinados periodos de tiempo, ante ello es necesario que los sistemas aborden la posibilidad de no solo registrar en forma automatizada la información de egreso e ingreso de unidades, si no también la posibilidad de interactuar fuera de línea con esta información mediante interfaces de uso amigables e intuitivas, teniendo la capacidad de mostrar la información de forma efectiva en forma de tablas y gráficas dinámicas, asu vez tenga también la capacidad de procesar información presente, esto anterior por el rubro de aplicación siendo esto cuando toneladas de residuos sólidos se están recibiendo en cada momento, además permitir la identificación efectiva de que porcentaje corresponde a cada municipio, de la misma manera que permita tener conocimiento de cuantas toneladas se están reciclando y sacando cada mes, permitiendo realizar una relación de cuántas toneladas se reciben y cuantas se procesan mes a mes. Esto anterior puede ser útil para la implementación de programas municipales personalizados para reducir la producción de residuos a favor de la conservación ambiental. En otra consideración, uno de los problemas con el uso de operadores humanos radica en que cada uno de ellos puede tener diferente información y/o un criterio de las personas autorizadas para el acceso vehicular, esto se debe por la dinámica cambiante de la organización en donde frecuentemente hay cambios por necesidad operativa, es decir, un nuevo vehículo puede tener un acceso autorizado en donde el operador pudiera no estar enterado, de la misma manera, puede haber desconocimiento de todos los operadores cuando un vehículo pierde permiso de acceso a la organización, esto crea un riesgo a la seguridad de todos los involucrados en la organización. Finalmente, una de las motivaciones para el desarrollo de sistemas automáticos para el control de acceso consiste en la

ISSN en trámite

reducción de tiempo para el procesamiento vehicular, así mismo, el tránsito puede ser ordenado de una forma sencilla beneficiando a la seguridad de los peatones que comparten el espacio de tránsito con vehículos, así mismo, los beneficios en la productividad se reflejan al incrementar la capacidad de procesamiento para los vehículos, siendo más evidente si se trata de vehículos de carga con materias primas [5].

1.1 Organización del documento

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se encuentra la descripción del flujo de trabajo del relleno sanitario en donde se identifica las necesidades particulares de diseño del sistema, en la sección III puede ser consultados los componentes principales del sistema, la sección IV presenta los resultados obtenidos, posteriormente la sección V presentan las conclusiones correspondiente al trabajo y finalmente en la sección VI se presentan las referencias bibliográficas.

II. FLUJO DE TRABAJO DEL RELLENO SANITARIO

Para el presente proyecto se utilizó como objeto de estudio el relleno sanitario del municipio de Cuitláhuac Veracruz, México, en forma tradicional de trabajo, el relleno generaba tickets con la información de cada acceso, para ello son necesarios dos tickets por cada unidad vehicular que ingresaba al depositar los residuos urbanos, uno de estos tickets era conservado y el otro entregado a la unidad, así mismo día tras día se hacía uso de hojas de papel para la generación de comprobantes de ingreso para las diversas unidades provenientes de distintos municipios, una vez generados debían ser transportarlos por un trabajador hacia las oficinas administrativas para posteriormente ser capturados en formatos digitales, después de ello era necesario almacenar la información tanto física como digital, asegurándose de disponer del espacio físico e informático respectivamente. Una de las dificultades era realizar búsquedas de información histórica representando una tarea complicada al operador por estar contenida en papel y desvinculada de la información digital, de esta manera, se presenta carencia en la optimización de estas tareas, algunas necesarias para auditorías en regulación de materia ambiental vigente. De esta manera el diseño se centró en la adquisición automática de la información, además del envió, recepción de información, de la misma manera fue prioritario el diseño de interfaces que permitieran a todos los usuarios y administradores del relleno acceder a la información remotamente mediante internet, de la misma maner y gestionarla con la posibilidad de procesar la gran cantidad de información aplicando filtros y cálculos estadísticos de los residuos de forma automática, así mismo, consultar la información mediante gráficas y tablas dinámicas.

III: SISTEMA DE CONTROL DE ACCESO VEHICULAR Y ADMINISTRATION

El sistema desarrollado se compone principalmente de dos elementos destacados y estos son: el sistema mecatrónico y el sistema informático. En cuando al primero, se desarrolló una PCB para interconectar la etapa potencia y la etapa de control del sistema, de esta manera el circuito impreso fue creado con la función principal de adquirir y enviar las señales para el funcionamiento lógico del sistema, gracias a ello, el sistema permite operar los elementos electromecánicos y el controlador para la apertura y cierre del acceso, particularmente estos elementos son la barrera de control vehicular y el sensor de masa necesario para determinar la presencia de un vehículo, el sensor que se utiliza es el ZKTeco U100E. A continuación, en la Figura 1 se presenta el aspecto de la PCB.

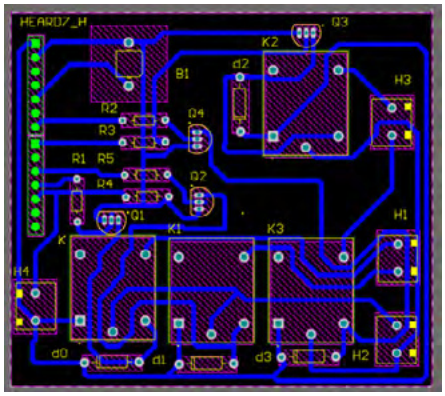


Fig. 1 Circuito Impreso

A continuación, se presenta el modelo 3D del circuito impreso tal como se aprecia en la Figura 2, en la imagen se puede observar los componentes utilizados para el funcionamiento del circuito impreso como lo son los relevadores y las terminales de conexión con el controlador, éste último se trata de una tarjeta Raspberry Pi 4 que compone la etapa de control del sistema.

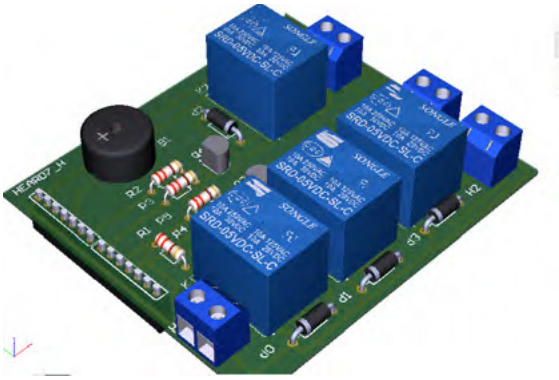


Fig. 2 Diseño 3D de circuito impreso

Para la programación de la Raspberry Pi 4 se utiliza Python, para ello, se programa tanto la adquisición de señales, como es el caso de la señal de detección del vehículo, así como las señales de salida, como por ejemplo, la activación de la pluma vehicular, de igual manera, las señales internas de la tarjeta son solo de tipo

ISSN en trámite

digital, además, se utilizan ciclos de condición de tipo "If", para que dependiendo de las condiciones operativas actuales de la empresa el sistema ejecute la acción correspondiente. Las conexiones para el circuito impreso y los componentes externos que integran el funcionamiento completo del controlador se muestran en la Figura 3, en ella se observan señaladas las conexiones principales entre el controlador y el circuito impreso mostrado en la Figura 2.

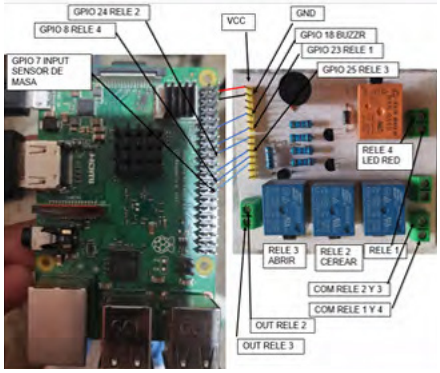


Fig. 3 Conexión circuito impreso a controlador

De la misma manera, se utiliza una barrera vehicular WJDZ 101-13 la cual tiene una longitud del brazo de 4.5 m, de esta manera, para establecer la proyección física de la misma fue establecida en el software SolidWorks, tal como se muestra en la Figura 4.

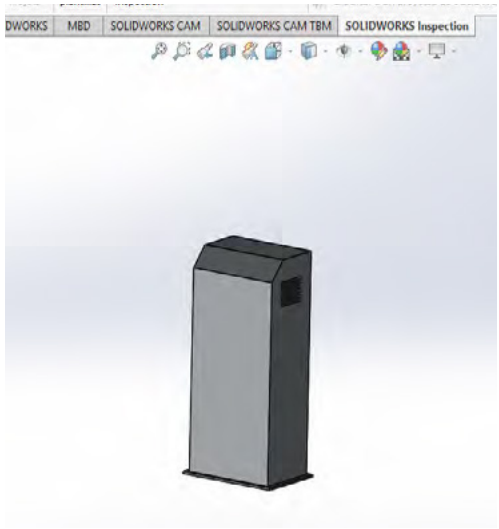


Fig. 4 Conexión circuito impreso a controlador

Con respecto al lector de tarjetas UHF (por sus siglas en inglés *Ultra High Frequency*), la barrera estará situada a 4 m de la entrada (ver Figura 5 y Figura 6).

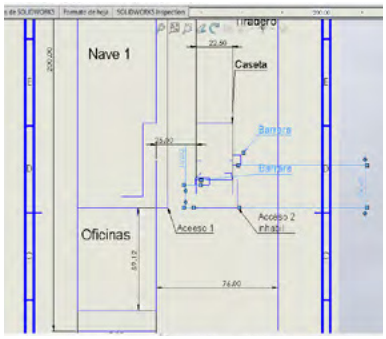


Fig. 5 Ubicación física de la barrera vehicular



Fig. 6 Vista satelital del relleno sanitario

Los aspectos lógicos ejecutados internamente por el controlador y fuera de él, así como las señales procesadas por los servidores fueron tomados como tareas importantes para el funcionamiento correcto del sistema, en la Figura 7 se presentan los rasgos generales de las funciones que realiza el controlador.

ISSN en trámite



Fig. 7 Funciones de programación

Como inicio, el controlador espera la señal proveniente del lector RFID encargado de reconocer cuando una unidad se posiciona dentro de su alcance para ingresar o salir del relleno, cuando esta acción ocurre, el controlador procede a vincularse con el servidor y validar el código recibido, esta validación es realizada por parte del servidor mientras que el controlador espera una confirmación de aceptación y/o rechazo, también dentro del servidor se realiza el almacenado de la información en caso de que la unidad sea validada exitosamente, por último en el proceso, una vez recibida la confirmación el controlador y mediante el circuito impreso se ejecuta la acción de apertura de la barrera y proyecta a un monitor el folio del registro y la información devuelta por el servidor, esta información incluye los datos principales como el tipo de unidad que ingresa, su capacidad de carga, la fecha y hora, el folio del registro, los importes y una imagen de la unidad en cuestión. Con la información generada y almacenada, las interfaces online se encargaran del gestionarla y permitir a los usuarios y administradores consultarla en línea, de la misma manera, con la información generada con anterioridad puede ser consultada a través de diversos filtros, así mismo, es posible la generación de tablas, gráficas o cálculos automáticos. A continuación se presenta una de las pantallas de la interfaz como se puede apreciar en la Figura 8.



Fig. 8 Interfaz de usuario del sistema de control vehicular

IV. RESULTADOS

Para mostrar y validar los resultados del sistemas desarrollado se analiza el tiempo de procesamiento de la información operativa en el relleno sanitario, para ello, la implementación del sistema refleja una reducción de tiempo considerable aumentando la productividad, en el gráfico de barras de la Figura 9 se muestra en el eje horizontal el tiempo necesario utilizado para la generación de los registros de los vehículos, específicamente 100 y 200 de ellos, la escala de tiempo es presentado en minutos, para ello se tomaron la siguientes consideraciones: el tiempo de generación de un recibo en color azul y el tiempo de registro y procesamiento de la información operativa en color naranja, para ello, en la gráfica se muestra una reducción de tiempo promedio del 89.55% con el uso del sistema, aunado a ello un 74.3% en la reducción del tiempo de búsqueda de alguna información operativa específica a una fecha.

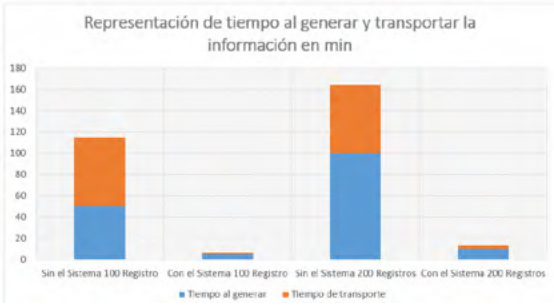


Fig. 9 Gráfica del tiempo de generación y procesamiento de la información operativa del relleno sanitario

Por otra parte, a partir de las pruebas realizadas en el relleno sanitario también se obtuvieron los siguientes resultados: al implementar el sistema de control de acceso vehicular se reduce en forma considerable la necesidad de utilizar papel, debido a que prácticamente se omite uso al generar los registros en formato digital y de forma automatizada, a continuación se muestra una gráfica que representa una comparativa en el consumo de hojas de papel con la implementación del sistema y sin la implementación, esto en base a los datos existentes del mes de diciembre de 2021, lo anterior se visualiza en la Figura 10.



Fig. 10. Gráfica de utilización de papel

Por último, considerando al no tener la necesidad de generar los recibos y la innecesaria la adquisición de papel; conlleva a la reducción de costos para este fin, para ello, a continuación se presenta la gráfica mostrada en la Figura 11, en ella, el eje

ISSN en trámite

vertical presenta la magnitud de valor en pesos mexicanos, y en el eje vertical el periodo de tiempo en semanas, se tomó como consideración inicial la adquisición de las hojas necesarias en base a la cantidad de recibos generados.

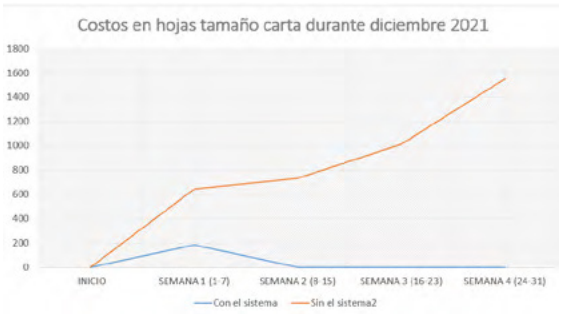


Fig. 11 Gráfica costos

VI. CONCLUSIONES

Los resultados muestran datos favorables desde el punto de vista tecnológico, económico y ambiental a través del diseño y desarrollo del sistema, mediante herramientas digitales que combinan sistemas de diseño mecatrónico en conjunto con sistemas de diseño informático se muestra una capacidad de adaptación como de propuesta de solución a problemáticas específicas y particulares de cada organización. El sistema es capaz de adaptarse a las necesidades particulares del caso de estudio para facilitar la operatividad de la organización.

REFERENCIAS

[1] Börklü H., Kalyon S. “A design study of an innovative barrier system for personal parking lots”, *Gazi University Journal of Science, Part a: engineering and innovation.* Vol. 4(4), pp. 113-123. 2017.

[2] Morthi S. “Automated barrier gate system by using RFID (ABGS)”, *Bachelor of computer science, University Malaysia Pahang*. 2019.

[3] Nidhi T. “Automatic gate authentication system for RFID tags and Thai ID cards”, *Master Thesis, Asian Institute of Technology School of Engineering and Technology Thailand*. 2017.

[4] Kasym K., Sarsenen A., Segizbayev Z., Junuskaliyeva D., Hazrat Md. “Parking gate control based on mobile application”, *2018 Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) and 2018 2nd International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR)*, pp. 399-403. June 2018.

[5] Ullah F., Anwar H., Shahzadi I., Rehman A., Mehmood S. Niaz S. et al. “Barrier access control using sensors platform and vehicle license plate characters recognition”, *Sensors,* Vol. 19, pp. 1-20. 2019.

ISSN en trámite

Diseño e Implementación de un prototipo de Termómetro Infrarrojo sin contacto de Largo Alcance conectado a redes Bluetooth Low Energy

Aldo-Eleazar Pérez-Ramos*. Faustino Sergio Villafuerte Palavicini. Josué Hueto López*, Roberto Tamar Castellanos Baltazar*. Víctor Manuel Jiménez Ramos* Héctor Ramón Azcaray Rivera***

**TecNM-Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, 68033 MX (Tel: 646-116-5311 e-mail: dr.aldo@ itoaxaca.edu.mx).*

***TecNM-Instituto Tecnológico de Tlaxiaco, Oaxaca, 69800, MX (e-mail: faustino_vp@tlaxiaco.tecnm.mx)*

Resumen: Actualmente, la pandemia de COVID-19 ha ocasionado millones de contagios alrededor del mundo. Una de las medidas adoptadas a nivel mundial para la identificación de personas con síntomas de COVID-19 es el cribado de temperatura. Esta medida sigue llevándose a cabo principalmente al ingresar a recintos públicos empleando termómetros infrarrojos sin contacto (NCIT) portátiles y fijos. Sin embargo, la mayoría de estos dispositivos suelen entregar valores de temperatura inexactos debido a factores internos y externos al mismo. En este trabajo se describe el diseño e implementación de un prototipo de NCIT de largo alcance conectado a redes Bluetooth Low Energy (BLE). El funcionamiento del prototipo fue evaluado con respecto a un NCIT de referencia calculando el Error Absoluto Medio (MAE), el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y análisis Bland-Altman. Los resultados muestran que es posible obtener valores de temperatura confiables incluso a una distancia de medición de 80 cm.

Palabras clave: Termómetro infrarrojo, NCIT largo alcance, Emisividad, MLX90614-DCI, COVID-19.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la crisis sanitaria provocada por el virus SARS-CoV-2 y sus variantes han ocasionado millones de contagios alrededor del mundo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y organismos sanitarios de los diferentes países informaron que los síntomas principales provocados por la COVID-19 son fiebre, tos seca y fatiga, (Di Gennaro, Francesco, et al., 2020). Una de las medidas adoptadas a nivel mundial para la identificación de personas con COVID-19 es el cribado de temperatura, realizado principalmente en la entrada de los recintos públicos utilizando termómetros infrarrojos sin contacto (NCIT, por sus siglas en inglés). Estos dispositivos han sido diseñados para entregar valores de temperatura confiables cuando se colocan a una distancia no mayor de 10 cm de la frente de la persona bajo medición (F-PBM). No obstante, se han identificado limitaciones importantes en su funcionamiento. Por ejemplo, se obtienen valores de temperatura inexactos provocados por: 1) mediciones en exteriores, cuando los termómetros están expuestos a luz solar intensa o cercanos a fuentes de calor; 2) la toma de temperatura a diferentes distancias y en zonas del cuerpo no recomendadas por el fabricante (p.ej. distancias mayores a 10 cm y en zonas como la muñeca y dorsal de la mano); 3) otros factores como: humedad relativa del ambiente, maquillaje y/o sudor en la F-PBM, etc.

De los factores antes mencionados, el segundo suele ser un problema recurrente en los controles de acceso, esto principalmente porque los NCIT carecen de un sistema para informar al usuario que se encuentra a la distancia correcta para realizar la medición, o no disponen del hardware y firmware con el que automáticamente puedan compensar las variaciones en las distancias de medición por encima de los 10 cm. Por otro lado, estos dispositivos no tienen conectividad a dispositivos externos con acceso a Internet, por lo que están limitados a proporcionar la temperatura en un entorno local, sin tener la oportunidad de llevar un registro completo automatizado sobre las incidencias que pudieran presentarse en los puntos de cribado de temperatura, dicha información facilitaría la toma de decisiones por parte de las autoridades sanitarias.

Recientemente se han reportado en la literatura prototipos de NCIT para aplicaciones médicas utilizando componentes electrónicos de bajo a mediano costo, con firmware desarrollado bajo licencias de uso libre, actuadores para reproducir instrucciones de voz y alcances de medición de hasta 60 cm, (Mnati, M. J., et al., 2021, Varshini, B., et al., 2021, Costanzo, S. y Flores A., 2020, Chen, Jing, et al., 2017, Johnson, T., 2018). Sin embargo, ninguno de estos dispone de un subsistema de comunicación inalámbrica que le permita conectarse a dispositivos inteligentes o plataformas del Internet de las Cosas (IoT) con las cuales se podrían monitorear y generar registros periódicos de la temperatura de las personas que ingresan a algún recinto.

En este trabajo se describe el diseño e implementación de un prototipo de NCIT de largo alcance dotado con un módulo para

ISSN en trámite

estimar la distancia y un módulo de comunicación Bluetooth de baja energía (BLE por sus siglas en inglés). El funcionamiento del prototipo fue evaluado con respecto a un NCIT de referencia calculando el Error Absoluto Medio (MAE por sus siglas en inglés), el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE por sus siglas en inglés) y análisis Bland-Altman. Los resultados muestran que es posible obtener valores de temperatura confiables incluso a una distancia de medición de 80 cm.

2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO PROPUESTO

2.1 Diseño del Hardware

El prototipo consta de 3 bloques: unidad de potencia, unidad de control lógico y comunicaciones, y la unidad de sensores.

2.1.1 Unidad de Potencia.

Esta unidad cosiste de un regulador de pared que convierte 127 V_{CA} a 9 V_{CD}, este voltaje alimenta a un par de reguladores lineales de voltaje con salida de 5 V_{CD} y 3.3 V_{CD} @500 mA. Como se puede observar esta unidad de potencia entrega voltaje y corriente de forma ininterrumpida a todos los componentes electrónicos del prototipo y fue de gran utilidad durante el desarrollo de las evaluaciones de funcionamiento. Sin embargo, para un funcionamiento independiente de una línea de 127 V_{CA}, el prototipo también dispone de un banco de baterías de litio de 7.4V @1500mAh. Este voltaje se ingresa a la entrada de la fuente con los reguladores lineales de 5 V_{CD} y 3.3 V_{CD}.

2.1.2 Unidad de Control Lógico y Comunicaciones.

La unidad de control lógico y comunicaciones está formada por el microcontrolador (MCU por sus siglas en inglés) de 8 bits PIC18F47Q10 de 40 pines, una pantalla OLED SSD1306 y el módulo Bluetooth Low Energy (BLE) RN4870-Click. Todos estos dispositivos se interconectan utilizando la tarjeta de desarrollo DM164136 de Microchip, aprovechando su diseño es posible una conexión directa con el radio y con otro tipo de tarjetas al disponer de conectores suficientes para dicho propósito.

El MCU seleccionado tiene una capacidad de procesamiento de 16 MIPS funcionando a 64 MHz. Además, cuenta con más de 10 pines de entrada/salida digital, interfaces de comunicación serial (I2C, SPI, EUSART) y más de 10 canales analógicos conectados a un convertidor analógico digital de 10 bits. Posee 128 KB de memoria de instrucciones y 3.615 KB de memoria de datos, suficiente para almacenar el firmware del prototipo. En la unidad de control lógico se ejecutan funciones de activación, comunicación y configuración de sensores, pantalla OLED y el subsistema de comunicaciones BLE. Con estas funciones es posible adquirir, procesar y transmitir los parámetros de temperatura ambiente, temperatura corporal y distancia hacia dispositivos externos para desplegar estos valores.

Por otra parte, el subsistema de comunicaciones está basado en el módulo RN4870, el cual tiene implementados los protocolos de comunicación y los roles de la versión 4.1 de BLE. El rol de “dispositivo periférico” fue programado en el prototipo para establecer un enlace de comunicación bidireccional BLE con un teléfono inteligente, este enlace inalámbrico también puede establecerse con dispositivos externos BLE como laptops, tabletas electrónicas, entre otros. Adicionalmente, el módulo puede funcionar en dos modos: Comandos o Datos. En el primer modo, es posible controlar la conexión/desconexión del dispositivo a la red BLE, acceder a las características del perfil de atributos genéricos (GATT por sus siglas en inglés), configurar la potencia de transmisión, modificar la velocidad de datos entre el MCU y el módulo BLE, cambiar de nombre con el que se anuncia el dispositivo, etc. En el modo de Datos se puede intercambiar información utilizando el servicio GATT privado “UART transparente”. Este servicio simplifica las transferencias de datos en serie a través de dispositivos BLE. Por último, es importante señalar que las características de la potencia de transmisión, configurable desde -25 dBm a 0 dBm, ganancia de la antena +2dBi, sensibilidad del receptor -90 dBm y la emisión de señales en la banda Industrial Científica y Médica (ISM por sus siglas en inglés) de 2.4 GHz habilitan un enlace de comunicaciones menor a 10 m en un entorno de interiores.

2.1.3 Unidad de Sensores.

La medición de la temperatura se realiza mediante el sensor MLX90614-DCI de la compañía Melexis, el cual está embebido en una tarjeta de desarrollo SEN0263 Gravity de la compañía DFRobot. Este sensor mide la temperatura de la superficie de un objeto por medio de la detección de su radiación infrarroja. El sensor consta en su interior de un sistema óptico, un detector fotoeléctrico, un amplificador, un procesador digital de señales (DSP por sus siglas en ingles) y módulo de salida. El sistema óptico recoge la radiación infrarroja en su campo de visión (5° para la versión DCI) y la energía de la radiación infrarroja se convierte en señales eléctricas cuando convergen en el detector fotoeléctrico. Una vez que estas señales son amplificadas, digitalizadas por un convertidor analógico digital de 17-bits y procesadas por el DSP, la señal se convierte en un valor de temperatura. Adicionalmente, es importante señalar que la versión DCI tiene una resolución de temperatura de 0.02°C en el intervalo de temperatura corporal (36 °C a 40°C). El valor del parámetro de emisividad configurado de fabrica en el dispositivo es de 1.0. y la comunicación entre la unidad de control lógico y el sensor es llevada a cabo por medio del protocolo I2C.

Por otro lado, la medición de distancia se realiza con el módulo sensor VL53L0X de la compañía STMicroelectronics. Esta es una opción de muy bajo costo, de pequeño factor de forma, de bajo consumo de energía, con un alcance máximo de 1 m y con una precisión de ± 0.30 cm. Además, este sensor emite una luz no visible (940 nm) de muy baja potencia (Laser clase 1: Estándar IEC 60825-1:2014) por lo que su uso no causa daños al ojo humano. Adicionalmente, puede funcionar en ambientes con

ISSN en trámite

niveles altos de luz infrarroja, no necesita de óptica adicional para funcionar, incluye regulador de voltaje, la interfaz de comunicación es I2C, es sencillo de configurar y existe amplia documentación técnica.

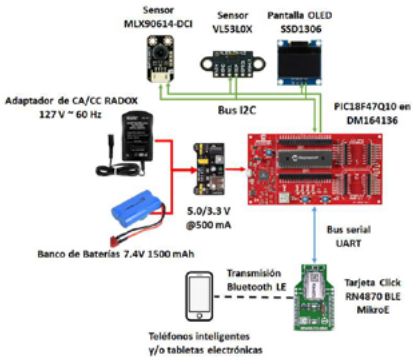


Fig. 1. Diagrama de conexión de los componentes electrónicos del prototipo NCIT de largo alcance BLE.

En la Fig. 1 se muestra un diagrama de conexión de los componentes electrónicos del prototipo NCIT de largo alcance BLE utilizados y los buses de comunicación entre los dispositivos.

2.2 Diseño de Firmware

El prototipo tiene implementado un firmware que ejecuta funciones de configuración e inicialización de puertos de entrada/salida digital, interfaces de comunicación (I2C, UART), sensores y módulo de comunicación. Además, inicializa las variables del firmware, por ejemplo, 'T_{amb}', 'T_{frente}' y 'D_{fs}' para almacenar los valores de temperatura ambiente, de la frente de la persona bajo medición (F-PBM) y distancia respectivamente.

En el firmware existen dos métodos para activar el proceso de medición de temperatura y distancia. El primer método consiste en presionar un interruptor mecánico, tal y como sucede en la mayoría de los NCIT comerciales, y el segundo método es por medio del comando de activación 'X000 1010'b, el cual es transmitido por el dispositivo central BLE. El prototipo al recibir este comando cambia el estatus de la bandera RX-CMD para iniciar el proceso de medición. Al obtener y almacenar las lecturas de temperatura y distancia proporcionadas por los sensores, el sistema revisa el bit más significativo (MSB por sus siglas en inglés) del comando enviado por el dispositivo central. Si el bit es '0', el firmware funciona en modo de prueba, esto es, codificará en formato ASCII los resultados de temperatura y distancia y los transmitirá a la pantalla OLED y al dispositivo central BLE. Este modo de prueba fue utilizado durante las primeras dos etapas de evaluación del prototipo. Por otro lado, si el MSB del comando enviado por el dispositivo central es '1', el prototipo funciona en modo de largo alcance, esto es, se ejecuta el algoritmo de compensación automática de las lecturas de temperatura corporal para contrarrestar el impacto de la distancia de medición sobre estos valores. Una vez que se realiza esta compensación, se codifican los valores en formato ASCII y se despliegan en la pantalla OLED y se transmiten hacia el dispositivo central BLE. Es importante mencionar que el firmware por default tiene habilitado el modo de prueba. En la Fig. 2 se muestra el firmware descrito en un diagrama de flujo.

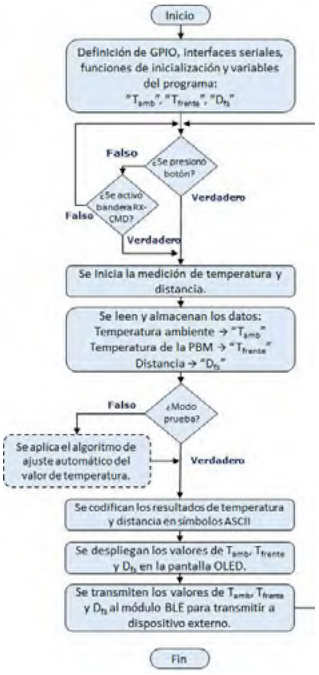


Fig. 2. Diagrama de flujo del firmware del dispositivo.

3. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

La evaluación del prototipo de termómetro infrarrojo sin contacto con conectividad Bluetooth de baja energía (NCIT-BLE) se llevó a cabo en tres etapas.

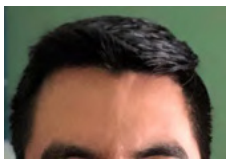


Fig. 3. Frente de la persona bajo medición (F-PBM).

En la primera etapa se realizaron un total de 1600 lecturas de temperatura de la frente de una persona bajo medición (F-PBM), ver Fig. 3, la cual se colocó a 5 cm de los sensores del NCIT-BLE y de un NCIT con certificado de la FDA (NCIT-FDA).

ISSN en trámite

En este trabajo los valores de temperatura proporcionados por el NCIT-FDA se consideran como la temperatura real (T_{real}) y los valores proporcionados por el NCIT-BLE (sin el algoritmo de compensación) como la temperatura estimada ($T_{estimada}$). Las mediciones de temperatura con ambos dispositivos se realizaron de forma simultánea, esto es, se formaron grupos de ($T_{real[1]}$, $T_{estimada[1]}$), ($T_{real[2]}$, $T_{estimada[2]}$), … ($T_{real[N]}$, $T_{estimada[N]}$). Adicionalmente, es importante mencionar que el parámetro de emisividad del sensor MLX90614-DCI del NCIT-BLE se modificó con 8 valores diferentes (0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.96, 0.97, 0.98 y 1.00) y se realizaron 100 mediciones con cada una de estas configuraciones. Es importante señalar que por cada una de las lecturas del NCIT-BLE, también se obtuvieron mediciones con el NCIT-FDA sin cambiar su emisividad. Con los datos obtenidos se computó el error absoluto medio (MAE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE) para cada configuración utilizando (1) y (2):

$$\begin{aligned} E_{absoluto}(i) &= T_{real}(i) - T_{estimada}(i) \\ MAE_{(0.80,0.85,\ldots 1.0)} &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} E_{absoluto}(i) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{relativo}(i) &= \frac{E_{absoluto}(i)}{T_{real}(i)} \\ MAPE_{(0.80,0.85,\ldots 1.0)} &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} E_{relativo}(i) \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

donde i especifica el número de la medición (T_{real}, $T_{estimada}$) y N es el número total de mediciones (N=100) para cada valor de emisividad programada en el NCIT-BLE.

El propósito de este análisis estadístico es identificar la configuración de emisividad que entrega el menor MAE y MAPE entre los valores de temperatura del prototipo propuesto y el termómetro de referencia, ambos colocados a la distancia recomendada por el fabricante del NCIT-FDA @ 5 cm. Finalmente, se realizaron 200 mediciones simultaneas con el NCIT-BLE (emisividad = 0.98) y el NCIT-FDA para obtener la concordancia de los valores por medio de un análisis Bland-Altman.

En la segunda etapa de evaluación se realizaron 200 mediciones de temperatura de la F-PBM con el NCIT-BLE para cada una de las distancias: 10-, 20-, 40-, 60- y 80 cm. Al igual que en la etapa anterior, por cada lectura con el NCIT-BLE se obtuvieron las correspondientes mediciones de temperatura corporal con el NCIT-FDA colocado a 5 cm de la F-PBM. Se recabaron los pares ordenados (distancia, temperatura) obtenidos del NCIT-BLE, se graficaron y con esta información se calculó la ecuación de la recta que mejor se ajusta a estos pares ordenados utilizando el método de mínimos cuadrados. Esta ecuación fue implementada en el algoritmo implementado en el NCIT-BLE para compensar el impacto de la distancia de medición sobre los valores de temperatura corporal.

En la tercera etapa se realizaron de nueva cuenta mediciones de temperatura de la F-PBM con el NCIT-BLE de largo alcance (prototipo con el algoritmo de compensación) a diferentes distancias dentro del intervalo de 5 cm a 80 cm. Se realizó un análisis de Bland-Altman (concordancia) entre las lecturas del NCIT-FDA colocado a 5 cm y el NCIT-BLE de largo alcance colocado a 80 cm de la F-PBM, esto con el propósito de demostrar que el prototipo entrega valores de temperatura dentro de los límites de concordancia, validando con ello su correcto funcionamiento a esta distancia máxima.

Finalmente, las tres etapas de evaluación se llevaron a cabo en un ambiente de interiores para registrar solo el impacto de la distancia de medición sobre las lecturas de temperatura realizadas. Se deja como trabajo a futuro su evaluación en un ambiente de exteriores. No obstante, consideramos que las características de los sensores seleccionados permitirán que el funcionamiento del prototipo sea robusto ante estas condiciones si las mediciones se realizan alejadas de las fuentes de calor y luz solar intensa. Además, es importante señalar que el número de mediciones realizadas en cada etapa se determinó considerando lo mencionado en (Llamosa, Luis Enrique et al., 2009) y en su referencia [3].

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de la primera etapa se presentan en la Tabla 1. Se puede observar que la menor MAE y MAPE se consigue con las configuraciones de emisividad 1.0 y 0.98, y las mayores se obtuvieron con configuraciones de emisividad menores a 0.95. No se recomienda el uso de estas últimas para nuestro prototipo.

Tabla 1. MAE y MAPE para diferentes configuraciones de emisividad del NCIT-BLE a 5 cm de la F-PBM.

Emisividad	$T_{real\text{-}media}$ (°C)	$T_{estimada\text{-}media}$ (°C)	MAE (°C)	MAPE (%)
0.80	36.56	38.23	1.66	4.55
0.85	36.59	38.14	1.55	4.23
0.90	36.60	37.5	0.785	2.14
0.95	36.59	36.65	0.136	0.37
0.96	36.59	36.85	0.264	0.72
0.97	36.6	36.71	0.141	0.39
0.98	36.58	36.57	0.11	0.30
1.00	36.67	36.68	0.08	0.22

Además, estudios reportados en la literatura mencionan que la tonalidad de piel es un factor que debe tenerse en cuenta al realizar la medición de temperatura con un NCIT. En este trabajo la F-PBM tiene una tonalidad de piel que pertenece al grupo 4 de la escala de Fitzpatrick y de acuerdo con un estudio realizado por (Johnson, T., 2018), se pueden tener lecturas de temperatura confiables con un sensor MLX90614-DCI configurado con un valor de emisividad de 0.98. Nuestros resultados en la Tabla 1 también confirman lo reportado por Johnson, motivo por el cual seleccionamos este valor para el prototipo propuesto.

ISSN en trámite

Con respecto al Análisis Bland-Altman, los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 4. Se puede observar que la mayoría de las diferencias entre los valores de temperatura entregados por los dispositivos se encuentran dentro del límite que hemos determinado como aceptable, esto es ±0.2°C. Este límite es inferior al que se puede encontrar en la mayoría de los NCIT con certificación de la FDA (±0.3°C). También es posible visualizar datos con diferencias de -0.3°C. Sin embargo, estos fueron solo 5 datos de un total de 200 mediciones, por lo que más del 97 % de los valores estuvieron entre los límites de concordancia de ± 1.96 desviaciones estándar. Los resultados obtenidos al realizar este análisis nos permiten validar las lecturas de temperatura realizadas con el prototipo propuesto a una distancia de medición de 5 cm.

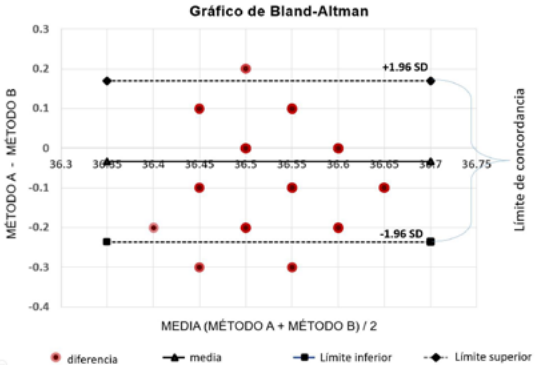


Fig. 4. Gráfico Bland-Altman para las mediciones obtenidas con el termómetro NCIT-FDA (Método A) y el termómetro NCIT-BLE (Método B), con la representación de los límites de concordancia desde -1.96 SD a +1.96 SD. SD es la desviación estándar.

Los resultados de la etapa 2 se muestran en la Fig. 5. Se observa que los pares ordenados (distancia, temperatura) obtenidos del NCIT-BLE exhiben una clara tendencia decreciente (línea punteada), este es el impacto de la distancia de medición sobre el valor de temperatura. Analizando estos valores se observa que hay una diferencia de 1.35 °C entre la temperatura medida a 5 cm con respecto a aquella medida a 80 cm. Esto comprueba la necesidad de un algoritmo que compense la atenuación del valor de temperatura. Adicionalmente, en la figura también se muestran como referencia las mediciones realizadas con el NCIT-FDA a 5 cm (línea continua).

Con los datos recabados, se calculó la ecuación de la recta que mejor se ajusta a los pares ordenados entregados por nuestra propuesta. La ecuación obtenida fue la siguiente:

$$y = -4\times10^{-5}x^2 - 0.0155x + 36.693 \quad (3)$$

donde x es el valor de la distancia entre el prototipo y la F-PBM.

La ecuación (3) forma parte del algoritmo de compensación diseñado y programado en la unidad de control lógico del prototipo, al agregar este algoritmo el prototipo se convierte en un NCIT de largo alcance.

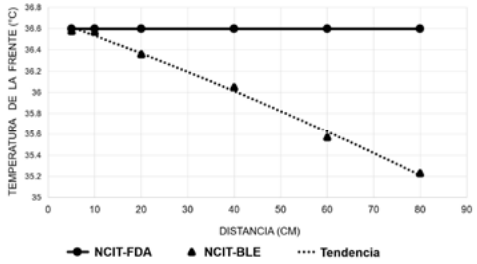


Fig. 5. Temperatura promedio de la F-PBM medida con el prototipo NCIT-BLE en el intervalo de 5 a 80 cm y temperatura promedio medida con el termómetro de referencia colocado a 5 cm de la F-PBM.

Los resultados de la tercera etapa se presentan en la Tabla 2 y en la Fig. 6. Se realizaron 200 mediciones por cada dispositivo, el NCIT-FDA se colocó a una distancia de 5 cm y el NCIT-BLE de largo alcance a 80 cm de la F-PBM.

Tabla 2. Concentrado de valores de temperatura promedio medidos con el NCIT-FDA, NCIT-BLE y NCIT de largo alcance BLE en el intervalo de 5 a 80 cm.

	A	B	C	D
Distancia (cm)	T_{real} (°C)	$T_{estimada}$ (°C)	$T_{Compensada}$ (°C)	A – C (°C)
5	36.6	36.58	36.56	0.04
10	36.6	36.57	36.57	0.03
20	36.6	36.36	36.58	0.02
40	36.6	36.06	36.59	0.01
60	36.6	35.57	36.57	0.03
80	36.6	35.23	36.57	0.03

Como se observa en la columna D de la Tabla 2 la diferencia entre la temperatura real promedio - obtenidas con el NCIT-FDA - y la temperatura compensada – entregadas por el prototipo NCITE-BLE en modo de largo alcance - resultan en valores que no superan los 0.05 °C. Esta diferencia es mínima y podríamos pensar que es suficiente para validar nuestro prototipo empleando el algoritmo de compensación. Sin embargo, es importante evaluar la concordancia entre los valores de temperatura medidos durante toda la prueba. Por tal motivo, se realizó un análisis Bland-Almant entre ambos dispositivos presentando los resultados en la Fig. 6. Se puede observar que todas las diferencias entre las mediciones son ≤ ± 0.2°C y solo 12 datos de 200 están por encima de los límites de concordancia, esto es más del 94 % de los valores estuvieron entre los límites de concordancia de ± 1.96 desviaciones estándar. Los resultados de este análisis también permiten validar las mediciones de

ISSN en trámite

temperatura entregadas por nuestro prototipo en modo de largo alcance.

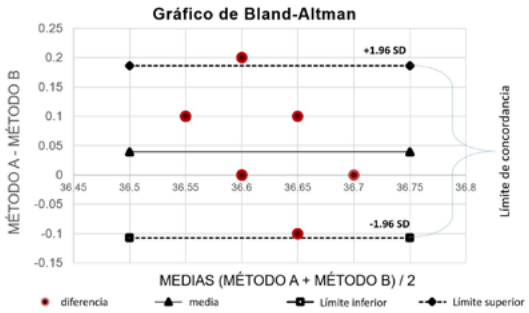


Fig. 6. Gráfico Bland-Altman para las mediciones obtenidas con el termómetro NCIT-FDA (Método A) a 5 cm y el prototipo de termómetro NCIT de largo alcance BLE (Método B) a 80 cm, con la representación de los límites de concordancia desde -1.96 SD a +1.96 SD. SD es la desviación estándar.

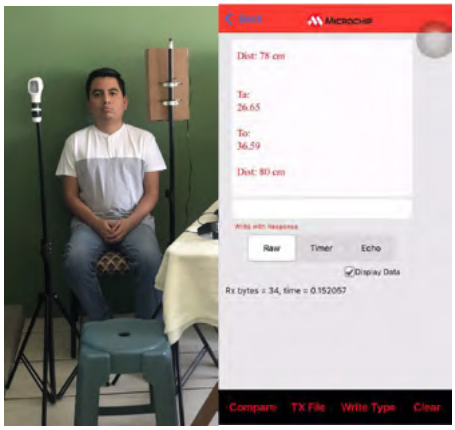


Fig 7. (a) Persona bajo medición en la zona de pruebas; (b) Interfaz desarrollada con Microchip Bluetooth Data.

Finalmente, en la Fig. 7 se muestran la PBM en la zona de pruebas y la aplicación para teléfono inteligente desarrollada con el Microchip Bluetooth Data (MDB). Esta aplicación permitió la transferencia de comandos y recolección de parámetros del NCIT-BLE de una forma sencilla.

5. CONCLUSIONES

Se reportó el diseño e implementación de un prototipo de NCIT de largo alcance conectado a redes Bluetooth Low Energy (BLE). El funcionamiento del prototipo fue evaluado con respecto a un NCIT de referencia en tres etapas.

En la primera etapa se comprobó que el prototipo configurado con un valor de emisividad de 0.98 entrega lecturas de temperatura con un MAE y MAPE de 0.11 °C y 0.30 % respectivamente. Además, los resultados del análisis de concordancia mostraron que más del 97 % de los valores de temperatura recolectados estuvieron entre los límites de concordancia de ± 1.96 desviaciones estándar. Estos resultados validaron su correcto funcionamiento a 5 cm de la F-PBM.

En la segunda etapa se registró el impacto de la distancia de medición sobre los valores de temperatura, se midió una diferencia de 1.35 °C entre las lecturas tomadas a 5 cm y 80 cm.

En la tercera etapa se comprobó que la diferencia entre los valores promedio de temperatura del NCIT de referencia, colocado a 5 cm de la F-PBM, y el NCIT de largo alcance BLE, colocado en el intervalo de distancias de 5 cm a 80 cm, es menor a 0.05 °C. Además, los resultados del análisis de Bland-Almant realizado indican que más del 94 % de los valores de temperatura estuvieron entre los límites de concordancia de ± 1.96 desviaciones estándar, lo que valida su correcto funcionamiento a 80 cm. Finalmente, durante todas las pruebas no se presentaron pérdidas de datos en el enlace BLE, por lo que también se valida su capacidad de conexión en un entorno de interiores.

REFERENCIAS

Chen, Jing, et al. (2017). High Precision Infrared Temperature Measurement System Based on Distance Compensation. ITM Web of Conferences. Vol. 12. EDP Sciences.

Costanzo, Sandra, and Alexandra Flores. (2020). A non-contact integrated body-ambient temperature sensors platform to contrast COVID-19. Electronics 9.10: 1658.

Di Gennaro, Francesco, et al. (2020) Coronavirus diseases (COVID-19) current status and future perspectives: a narrative review. International journal of environmental research and public health 17.8: 2690.

Dobesch, Aleš, and Juraj Poliak. (2013). IR thermometer with automatic emissivity correction. Radio engineering 22.4: 1301-1306.

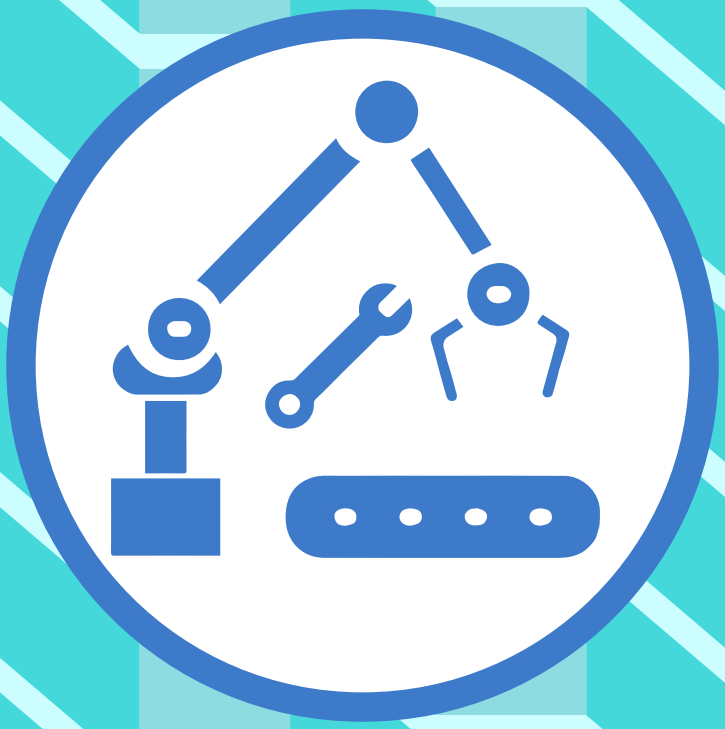
Giavarina, D. (2015). Understanding bland altman analysis. Biochemia medica, 25(2), 141-151.

Johnson, T., (2018). Improving Infrared Sensor Temperature Readings by Machine Analysis of Emissivity. Pace University. Available at: https://digitalcommons.pace.edu/dissertations/AAI13814821. [Accessed 1 May 2022].

Llamosa, Luis Enrique et al. (2009). Metodología para la estimación de la incertidumbre en mediciones directas. Scientia et technica 1.41.

Mnati, Mohannad Jabbar, et al. (2021). An open-source non-contact thermometer using low-cost electronic components. HardwareX 9: e00183.

Varshini, B., et al. (2021). IoT-Enabled smart doors for monitoring body temperature and face mask detection. Global Transitions Proceedings 2.2: 246-254.



INGENIERÍA MECÁNICA

cenidet

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Análisis dinámico de la condición inicial en modelo matemático de chimenea solar de un canal considerando un material masivo en la pared absorbente

C. E. Torres-Aguilar*, J. Arce**

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), C.P. 62080 Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: carlos.torres17ma@cenidet.edu.mx).
**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), C.P. 62080 Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: jesus.al@cenidet.edu.mx).

Resumen: El presente estudio describe la solución y análisis de la condición inicial de un modelo de chimenea solar de un solo canal bajo las condiciones climáticas de Hermosillo, Sonora. Se consideró el efecto de un material masivo para prolongar la ventilación natural. El sistema se evaluó durante tres días de modelación y se compararon los valores de temperatura y flujo de aire inducido en diferentes horarios. Los resultados mostraron que la comparación entre el primer y segundo día de modelación, la temperatura del muro varió hasta 17.89% y el flujo másico hasta 66.86% en las primeras seis horas de modelación. Entre el segundo y tercer día, las variaciones de temperatura y flujo de aire fueron menores a 1.13%. Se estableció que los resultados del segundo y tercer día son independientes de la condición inicial. El análisis de la condición inicial debe ser parte del análisis paramétrico de chimeneas solares para mejorar la predicción del comportamiento térmico del sistema.

Palabras clave: Chimenea solar, ventilación natural, condición inicial, balance de energía, estado transitorio.

Abstract: The present study focused on the solution and analysis of the initial condition of a single channel solar chimney model under climate conditions of Hermosillo, Sonora. The mathematical model considered the effect of a massive material to extend the natural ventilation. The system was evaluated during three modeling days, and the temperature and mass flow rate results were compared at different times. The results showed that the comparison between the first and second modeling days revealed wall temperature and mass flow rate variations of 17.89 and 66.86%, respectively; this occurred during the first six modeling hours. The solution differences between the second and third days were below 1.13% in temperature and mass flow rate results. The second and third modeling days showed suitable independence of the initial condition. The analysis of the initial condition must be included in the parametric analysis of solar chimneys to improve the accuracy of the results and predict the thermal behavior of the systems.

Keywords: S*olar chimney, natural ventilation, initial condition, energy balance, unsteady state.*

1. INTRODUCCIÓN

La ventilación es necesaria para el bienestar de los ocupantes ya que permite la remoción de contaminantes y facilita alcanzar un estado de confort térmico al introducir o extraer energía. Por ello, gran parte de la población recurre al uso de sistemas activos como aires acondicionados y ventiladores mecánicos. Sin embargo, la adquisición e implementación de estos sistemas activos, entre otros factores, ha generado un creciente incremento en el consumo energético a nivel mundial, ya que solo para el sector residencial y de construcción se ha cuantificado el 36% del consumo energético para el año 2018 **(International Energy Agency, 2019)**. Mientras que en México el porcentaje de consumo energético para el sector residencial, comercial y público es de 17.2% **(Balance Nacional de Energía, 2017)**.

En la búsqueda de proveer ventilación al interior de las edificaciones, se han buscado alternativas que permitan satisfacer esta necesidad de tal forma que no exceda el consumo energético y sin dañar el medio ambiente. Por tal motivo, en los últimos años se han llevado a cabo estudios relacionados con nuevos diseños o adaptaciones de las componentes de edificaciones que permitan inducir la ventilación natural. Entre los diferentes estudios se ha propuesto la implementación de sistemas pasivos como las chimeneas solares **(Awbi, 2003)**, con los que se busca inducir la mayor cantidad de ventilación natural posible y que sustituya

ISSN en trámite

por completo la necesidad de emplear sistemas activos para proveer ventilación.

En años recientes, los estudios de chimeneas solares se han enfocado en prolongar el tiempo en el que estos sistemas pasivos proveen ventilación, principalmente al evaluarse en viviendas bajo condiciones de clima cálido y cálido húmedo (**Godoy-Vaca et al.**, 2017). Por esta razón se han realizado estudios que involucran el uso de materiales masivos como el concreto, ladrillo y materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) con el fin de mejorar el desempeño de las chimeneas solares y prologar su tiempo de operación. Tal como en los estudios de **Martí-Herrero et al.** (2007) en el que emplearon materiales como concreto, o el de **Kaneko et al.** (2006) en el que se evalúo el desempeño de la chimenea solar empleando PCM como pared absorbente.

En cuanto a estudios de chimeneas solares en México, **Zavala-Guillén et al. (2016)** reportaron un estudio teórico mediante dinámica de fluidos computacional (DFC) de una chimenea solar de doble canal bajo condiciones de tres ciudades (Mérida, Yucatán; Ciudad de México; Hermosillo, Sonora); la evaluación se realizó para un día cálido de verano. **Tlatelpa-Becerro et al. (2019)** realizaron un estudio de chimenea solar de tres canales empleando un modelo CFD bajo las condiciones de Yecapixtla, Morelos. **Jiménez-Xamán et al. (2020)** realizó un estudio de una chimenea solar acoplada a una habitación bajo las condiciones de Mérida, Yucatán. En estos estudios, el modelo presentado fue solo en estado permanente y solo se consideraron placas absorbentes metálicas delgadas.

La evaluación de las chimeneas solares en estado transitorio permite analizar la evolución del comportamiento térmico del sistema y el flujo de aire inducido con fines de ventilación. Un aspecto que suele desestimarse en los modelos de chimeneas solares en estado transitorio es la evaluación de la condición inicial como parte del análisis, sobre todo al tratarse de chimeneas solares con elementos masivos, en los que se busca extender el tiempo de operación para proveer una mayor ventilación.

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es evaluar un modelo de chimenea solar de un canal (ChSo-SC) en estado transitorio a través de un modelo propuesto de balances de energía, bajo las condiciones del día más cálido de Hermosillo, con el fin de evaluar el impacto de las condiciones iniciales del sistema en la evolución del comportamiento térmico y el flujo de aire inducido.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen el modelo físico y matemático de la chimenea solar de un solo canal, así como las consideraciones del estudio para la evaluación de la condición inicial.

2.1 Modelo de chimenea solar de un canal (ChSo-SC)

El modelo matemático de la ChSo-SC propuesto en este trabajo es similar al modelo reportado por **Ong** (2003): se consideran los efectos convectivos y radiativos entre el ambiente exterior y la cubierta de vidrio, así como entre el canal y las superficies de la cubierta de vidrio y la placa absorbente. Sin embargo, como se observa en la Fig. 1, el presente modelo considera el efecto de la conducción de calor a través de la cubierta de vidrio y las placas absorbentes, estás ultimas funcionan como contenedores de un elemento masivo. Para este estudio se consideró ladrillo. Al ser de interés el efecto de la condición inicial y su impacto en el comportamiento térmico del sistema, el modelo se planteó en estado transitorio.

En la Fig. 1 se muestra el modelo físico de la chimenea de un solo canal, en el que se observan cada una de las componentes de los fenómenos físicos considerados. El nodo o elemento se consideró al centro de cada una de las componentes de las ChSo-SC tomando en cuenta el criterio de "elemento de placa delgada". A continuación, se expone el modelo de balance de energía por cada componente de la ChSo-SC.

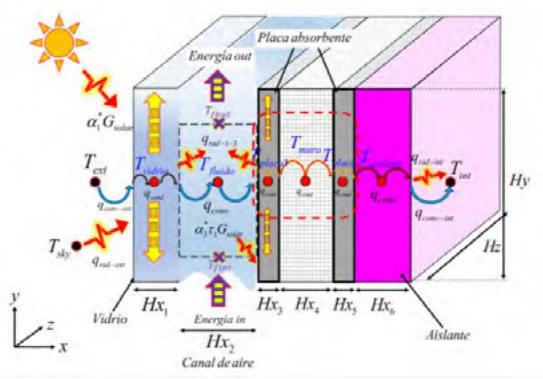


Figura 1 *Modelo físico de ChSo-SC*

Cubierta de vidrio.

Para el balance de energía de esta componente la resistencia convectiva y conductiva se incluyen en el mismo término del flujo de calor entre el ambiente exterior y el vidrio. Tanto la temperatura del ambiente exterior (T_{ext}), la temperatura del cielo (T_{sky}), la radiación solar incidente (G_{solar}) y el coeficiente convectivo ($h_{conv-ext}$) están en función del tiempo ya que se incluyeron en el modelo los datos recopilados por una estación meteorológica.

ISSN en trámite

$$\underbrace{\left(\frac{1}{h_{conv-ext}}+\frac{Hx_{vidrio}}{2\lambda_{vidrio}}\right)}_{a_1}A_{int}+\underbrace{\left(\frac{1}{h_{rad1}}\right)}_{a_2}A_{int}+\alpha^{*}_{vidrio}G_{solar}A_{int}$$
$$-\underbrace{\left(\frac{Hx_{vidrio}}{2\lambda_{vidrio}}+\frac{1}{h_{vidrio-fluido}}\right)}_{a_3}A_{out}-\underbrace{\left(\frac{1}{h_{rad,vidrio-placa1}}\right)}_{a_4}A_{out}$$
$$=\frac{d}{dt}(\rho C_P T)_{vidrio}A\Delta x \qquad A=A_{int}=A_{out} \tag{1}$$

Fluido del canal:

El fluido del canal considera los efectos de la convección entre las superficies de ambos elementos o superficies paralelas que conforman el canal y la remoción de energía debido al efecto del flujo másico generado por el efecto de las fuerzas de flotación. La resistencia conductiva incluida en ambos lados se debe a la transferencia de calor por conducción que se considera entre el centro de cada elemento sólido al área de contacto con el fluido del canal. Por continuidad, el flujo másico se considera constante a lo largo de todo el canal. El medio o fluido no son considerados radiativamente participantes.

$$\underbrace{\left(\frac{Hx_{vidrio}}{2\lambda_{vidrio}}+\frac{1}{h_{vidrio-fluido}}\right)}_{b_1}+\frac{m_{int}C_{P,int}T_{f,int}}{HyHz}$$
$$-\underbrace{\left(\frac{1}{h_{fluido-placa1}}+\frac{Hx_{placa1}}{2\lambda_{placa1}}\right)}_{b_2}-\frac{m_{out}C_{P,out}T_{f,out}}{HyHz}$$
$$=\frac{d}{dt}(\rho C_P T)_{placa1}A\Delta x \tag{2}$$

Placa absorbente metálica 1:

Al igual que la cubierta de vidrio, se consideran los efectos convectivos y conductivos combinados en la misma resistencia térmica. Se consideró el efecto del intercambio radiativo superficial entre la placa metálica y la cubierta de vidrio, así como la absorción de radiación solar transmitida a través del vidrio. En este modelo no se consideró el efecto de la resistencia térmica de contacto entre la cubierta metálica y el elemento de mampostería.

$$\underbrace{\left(\frac{1}{h_{rad,vidrio-placa1}}\right)}_{c_1}+\underbrace{\left(\frac{1}{h_{f-placa1}}+\frac{Hx_{placa1}}{2\lambda_{placa1}}\right)}_{c_2}A_{int}$$
$$+\alpha^{*}_{placa1}\tau^{*}_{vidrio}G_{solar}A_{int}-\underbrace{\left(\frac{Hx_{placa1}}{2\lambda_{placa1}}+\frac{\Delta x_{muro}}{2\lambda_{muro}}\right)}_{c_3}A_{out}$$
$$=\frac{d}{dt}(\rho C_P T)_{placa1}A\Delta x \tag{3}$$

Elemento de mampostería:

El balance de energía para el elemento de mampostería considera solamente los efectos conductivos al estar rodeado de elementos sólidos opacos. Este modelo puede modificarse para evaluar materiales masivos como materiales de cambio de fase y así añadirse más nodos o elementos seccionándolo para evaluar el efecto de la masa térmica a través del elemento.

$$\underbrace{\left(\frac{Hx_{placa1}}{2\lambda_{placa1}}+\frac{\Delta x_{muro}}{2\lambda_{muro}}\right)}_{d_1}A_{int}-\underbrace{\left(\frac{\Delta x_{muro}}{2\lambda_{muro}}+\frac{\Delta x_{placa2}}{2\lambda_{placa1}}\right)}_{d_2}A_{out}$$
$$=\frac{d}{dt}(\rho C_P T)_{muro}A\Delta x \tag{4}$$

Placa absorbente metálica 2:

El balance de la segunda placa que cubre al elemento de mampostería solo considera efectos conductivos y los cambios de la conductividad térmica entre los materiales evaluados. De igual forma que la placa 1, no se considera el efecto de la resistencia de contacto entre los diferentes elementos.

$$\underbrace{\left(\frac{\Delta x_{muro}}{2\lambda_{muro}}+\frac{Hx_{placa2}}{2\lambda_{placa2}}\right)}_{e_1}A_{int}-\underbrace{\left(\frac{Hx_{placa2}}{2\lambda_{placa2}}+\frac{Hx_{aislante}}{2\lambda_{aislante}}\right)}_{e_2}A_{out}$$
$$=\frac{d}{dt}(\rho C_P T)_{placa2}A\Delta x \tag{5}$$

Aislante térmico:

El aislamiento térmico es importante para reducir las pérdidas de energía a través de la parte posterior de la pared absorbente, Por esta razón, en el balance de energía se consideró el efecto de la conducción de calor a través de este elemento y la transferencia de calor por convección y radiación con el medio interno de la edificación.

ISSN en trámite

$$\underbrace{\left(\frac{Hx_{placa2}}{2\lambda_{placa2}}+\frac{Hx_{aislante}}{2\lambda_{aislante}}\right)A_{int}}_{f_1^t}\frac{T_{placa2}-T_{aislante}}{}$$
$$-\underbrace{\left(\frac{Hx_{aislante}}{2\lambda_{aislante}}+\frac{1}{h_{conv-int}+h_{rad-int}}\right)A_{out}}_{f_2^t}\frac{T_{aislante}-T_{int}}{}$$
$$=\frac{d}{dt}\left(\rho C_P T\right)_{aislante}A\Delta x \tag{6}$$

Los términos temporales se sustituyendo por una aproximación atrasada de primer orden a través del método de diferencias finitas. Las ecuaciones (1-6) se ordenaron en una matriz, la cual representa el sistema de ecuaciones resultantes del modelo de ChSo-SC:

$$\begin{bmatrix} (a_1+a_2+a_3+a_4+a_{F0}) & a_3 & a_4 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & (b_1+b_2+a_{F0}) & b_2 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & c_2 & (c_1+c_2+c_3) & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_1 & (d_1+d_2) & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_1 & (e_1+e_2) & e_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_1 & (f_1+f_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{vidrio} \\ T_{fluido} \\ T_{placa1} \\ T_{muro} \\ T_{placa2} \\ T_{aislante} \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} a_1T_{vidrio}+a_2T_{sky}+a_3T_{fluido}+a_4T_{placa1}+\alpha^*_{vidrio}G_{solar}+a_{F0}T^0_{vidrio} \\ bT_{vidrio}+b_2T_{placa1}+M_f+a_{F0}T^0_{fluido} \\ c_1T_{vidrio}+c_2T_{fluido}+c_3T_{muro}+\alpha^*_{placa1}\tau^*_{vidrio}G_{solar}+a_{F0}T^0_{placa1} \\ d_1T_{placa1}+d_2T_{placa2}+a_{F0}T^0_{muro} \\ e_1T_{muro}+e_2T_{aislante}+a_{F0}T^0_{placa2} \\ f_1T_{aislante}+f_2T_{int}+a_{F0}T^0_{aislante} \end{bmatrix} \tag{7}$$

En cuanto a la estimación del flujo másico inducido por la chimenea solar se empleó la relación reportada por **Ong (2003):**

$$m=C_d\frac{\rho_{f,out}A_{out}}{\sqrt{1+A_{int}/A_{out}}}\sqrt{\frac{2gHy\left(T_f-T_{int}\right)}{T_{int}}} \tag{8}$$

Para este estudio, se consideró ladrillo como material masivo de la pared absorbente. Las propiedades del sistema y otras consideraciones para la solución del modelo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Propiedades del sistema

Cubierta de vidrio	Placa de metal (aluminio) superficie color negro	Material masivo: ladrillo
Hx = 0.006 m	Hx = 0.0015875 m	Hx = 0.115 m
λ = 1.40 W(kg°C)$^{-1}$ C_P = 750.0 J(kg°C)$^{-1}$ ρ = 2500.0 kg m^{-3} ε = 0.840 α^* = 0.076 τ^* = 0.849	λ = 177.0 W(kg°C)$^{-1}$ C_P = 875.0 J(kg°C)$^{-1}$ ρ = 2770.0 kg m^{-3} ε = 0.9 α^* = 0.97	λ = 0.98 W(kg°C)$^{-1}$ C_P = 920.0 J(kg°C)$^{-1}$ ρ = 1980.0 kg m^{-3}

Poliestireno extruido (foamular)	Canal de aire	Información adicional
Hx = 0.025 m	Hx = 0.15 m	Hy = 2.0m Hz = 1.0 m g = 9.81 ms^{-2}
λ = 0.0001T+0.0262 W(kg°C)$^{-1}$ C_P = 1210.0 J(kg°C)$^{-1}$ ρ = 21.0 kg m^{-3} ε = 0.82	λ, C_P, ρ = Relaciones empíricas (Arce et al., 2013)	h_{int} = 10.0 W m^{-2} °C^{-1} h_{ext} = 2.8 + 3.0V_{wind} W m^{-2} °C^{-1} Orientación cubierta de vidrio: oeste Δt = 5 segundos

Nota: *Datos obtenidos de Incropera y DeWitt (1996), Kumaran (1996), Arce et al. (2013), ASTM C578-01 (2002)*

2.2 Algoritmo de solución

El diagrama de flujo de la solución del modelo de ChSo-SC se presenta a continuación.

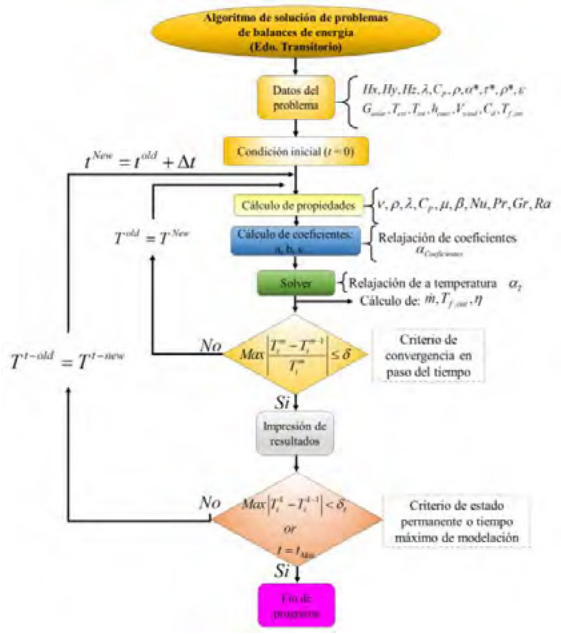


Figura 2 *Diagrama de flujo de la solución numérica*

Aunque el diagrama de flujo contempla un criterio de estado permanente, este criterio solo se tomó en cuenta para la realización de ejercicios de prueba ya que el objetivo del modelo es el estudio del sistema pasivo bajo condiciones climáticas reales en el que solo importa el análisis del fenómeno en el tiempo de modelación establecido por lo que en realidad no es posible obtener un estado de equilibrio del sistema.

Se empleó el solver Jacobi para la solución del sistema de ecuaciones resultante del modelo de la chimenea solar. Ambos modelos desarrollados de la chimenea solar de uno y doble canal fueron implementados en un código computacional

ISSN en trámite

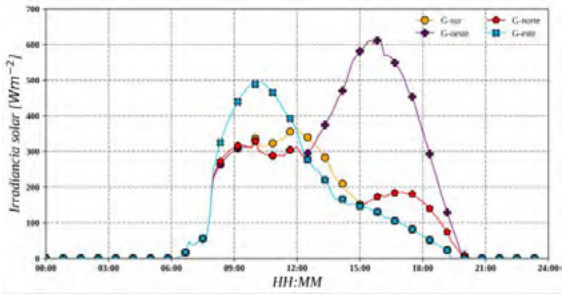
desarrollado en el lenguaje de programación ANSI-C. Todas las corridas computacionales fueron desarrolladas en una plataforma computacional: computadora con procesador Intel Core i5-8265U con 1.6GHz y 8GB de RAM, en un sistema operativo GNU/Linux (Ubuntu 18.05 de 64 bits).

2.3 Descripción del caso de estudio

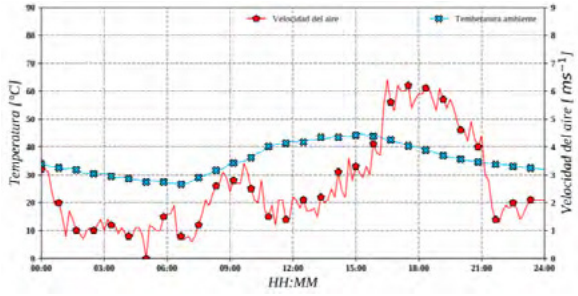
El estudio consiste en analizar cuando la solución es independiente de la condición inicial de la modelación. De acuerdo con lo reportado en la literatura, la modelación de estos sistemas pasivos suele realizarse estableciendo un tiempo de modelación y las condiciones climáticas de un día entero. Sin embargo, a pesar de tomar en cuenta las condiciones climáticas de principio a fin en la modelación, no es posible definir las condiciones iniciales del sistema para proceder con el análisis. Por lo tanto, se suele establecer que los elementos del sistema se encuentran a temperatura adivinada o propuesta.

Para este estudio, se tomaron en cuenta los datos climáticos de un día completo y se estableció que la temperatura de cada elemento al inicio es igual a la temperatura ambiente. Sin embargo, el tiempo de modelación y los datos climáticos se extendieron a tres días (72 horas), empleando un Δt = 5 segundos. Esto significa que se replicaron las condiciones climáticas tres días seguidos para comparar los valores de temperatura y flujo másico entre los diferentes días de modelación.

Para este análisis se tomaron en cuenta las condiciones climáticas del día más cálido del año 2018 (9 de junio) de la ciudad de Hermosillo, Sonora, proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En la Fig. 3 se presentan los datos de irradiancia solar y temperatura ambiente.



a)

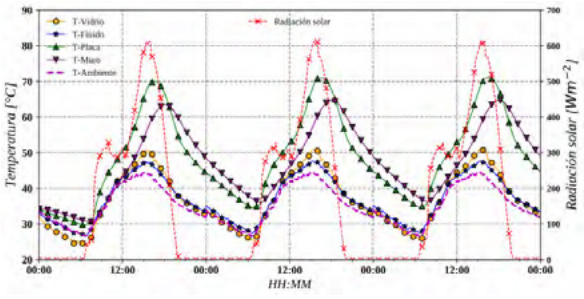


b)

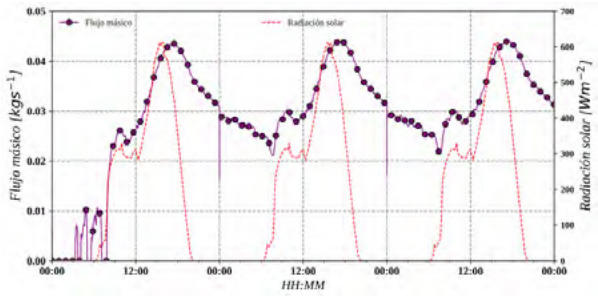
Figura 3 *Datos climáticos (CONAGUA): a) irradiancia solar, b) temperatura ambiente y velocidad del viento*

3. RESULTADOS

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento de las temperaturas y flujo másico de la ChSo-SC.

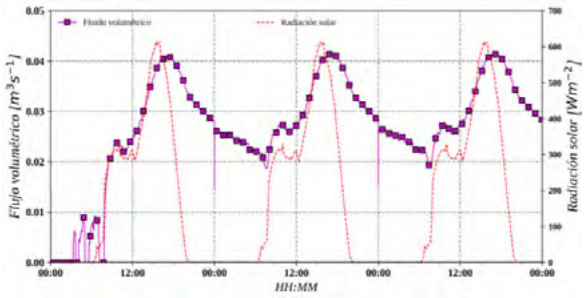


a)



b)

ISSN en trámite



c)

Figura 4 *Evolución del comportamiento de la ChSo-SC: a) temperaturas vs radiación solar, b) flujo másico vs radiación solar, c) flujo volumétrico vs radiación solar*

En la Fig. 4 se observa que las diferencias entre los valores de temperatura son más notorias entre el primer y segundo día de modelación en las primeras horas, principalmente en los elementos de la placa absorbente y al interior del muro de ladrillo. Sin embargo, las diferencias entre el segundo y tercer día son mínimas. La solución del sistema requirió de la modelación de un día adicional para que los resultados sean independientes de la condición inicial. En cuanto a los picos máximos, se observa que los comportamientos son muy similares en los tres días, solo se observa una diferencia menor entre el caso del primer y segundo día.

En cuanto al comportamiento del flujo másico, se observa una variación significativa entre el primer y segundo día de modelación durante la primera mitad del día. En cambio, esta diferencia se reduce entre el segundo y tercer día. Es durante este tiempo en el que las intermitencias en el flujo de aire inducido desaparecen y los valores registrados corresponden a una diferencia de temperaturas generado por el calor sensible que el sistema entrega al fluido debido al almacenamiento de energía del día anterior. Lo cual es un comportamiento normal al tomar la evaluación del sistema en un día típico, ya que el sistema siempre trata de alcanzar el equilibrio con las condiciones del medio circundante como se supone al inicio de la modelación. El comportamiento de los picos fue similar en los tres días de modelación, sin embargo, se presentó un descenso súbito de la temperatura y flujo de aire inducido justo al pasar la media noche en cada día de modelación, lo cual se debe a la condición de temperatura de entrada, como se observa en la Fig. 4(a). Esto consiste en una elevación súbita de la temperatura ambiente que es empleada como valor de temperatura de entrada en la chimenea, ya que la temperatura al final del día no coincide con la temperatura al inició; los datos climáticos corresponden al mismo día repetidos tres veces y no como tal la medición continua de los tres días, por lo tanto, al aumentar la temperatura del fluido a la entrada, se reduce la diferencia de temperatura entre el fluido al interior y entrada del canal provocando que disminuya súbitamente el flujo de aire inducido. Sin embargo, esta diferencia se estabiliza en cuanto transcurren los primeros minutos del nuevo día hasta que la diferencia de temperaturas es similar a los valores previos a medianoche.

En la Tabla 2 se presentan las diferencias porcentuales de las variables de temperatura y flujo másico para tres instantes de tiempo en cada día de modelación: 6, 12, y 18 horas. La comparación se realizó entre los resultados del primer día y segundo día, y los resultados del segundo día y tercer día.

Tabla 2 Diferencias porcentuales entre los días de modelación

Tiempo de modelación = 21600 s (6 hrs)					
T_{vidrio} Día 1-2	T_{vidrio} Día 2-3	T_{fluido} Día 1-2	T_{fluido} Día 2-3	T_{placa} Día 1-2	T_{placa} Día 2-3
5.4122	0.1770	3.0514	0.0749	14.9410	0.4894
T_{muro} Día 1-2	T_{muro} Día 2-3	m Día 1-2	m Día 2-3	V Día 1-2	V Día 2-3
17.8902	0.6004	66.8613	1.1152	67.0545	1.1281
Tiempo de modelación = 43200 s (12 hrs)					
T_{vidrio} Día 1-2	T_{vidrio} Día 2-3	T_{fluido} Día 1-2	T_{fluido} Día 2-3	T_{placa} Día 1-2	T_{placa} Día 2-3
1.4489	0.0469	0.6404	0.0189	4.3940	0.1423
T_{muro} Día 1-2	T_{muro} Día 2-3	m Día 1-2	m Día 2-3	V Día 1-2	V Día 2-3
6.7936	0.2217	9.5746	0.2758	9.7690	0.2828
Tiempo de modelación = 64800 s (18 hrs)					
T_{vidrio} Día 1-2	T_{vidrio} Día 2-3	T_{fluido} Día 1-2	T_{fluido} Día 2-3	T_{placa} Día 1-2	T_{placa} Día 2-3
0.3984	0.0128	0.1912	0.0057	1.2596	0.0407
T_{muro} Día 1-2	T_{muro} Día 2-3	m Día 1-2	m Día 2-3	V Día 1-2	V Día 2-3
1.9505	0.0632	1.2115	0.0369	1.2719	0.0370

Nota: *valores en negritas representan valores porcentuales (%)*

Las diferencias porcentuales más altas se presentaron durante las primeras horas del primer y segundo día de modelación. Sin embargo, estas diferencias disminuyeron conforme aumentó el tiempo. Las diferencias porcentuales máximas fueron desde 17.89% hasta caer a un 1.95% en los valores de temperatura del muro. Sin embargo, los valores de flujo másico y volumétrico revelaron las diferencias más altas durante las primeras horas de modelación al presentar una diferencia porcentual de 66.86 y 67.05% respectivamente; de la misma forma que los valores de temperatura, la diferencia entre los valores de flujo de aire se redujo hasta 1.21 y 1.2% respectivamente durante el transcurso del día de modelación.

En contraste, al comparar los resultados del segundo y tercer día de modelación, las diferencias porcentuales máximas entre los valores de temperatura durante las primeras horas de cada día estuvieron por debajo del 1%. Respecto a la comparación de los valores de flujo de aire inducido por la chimenea solar, la

ISSN en trámite

diferencia porcentual máxima registrada fue de 1.12% entre los valores de flujo volumétrico a las 6 horas de modelación. Estas diferencias porcentuales son aceptables y permiten establecer que se ha alcanzado la independencia de la condición inicial.
Ya que es de interés evaluar el desempeño de los materiales masivos más allá de un solo día de modelación, para el caso de la ChSo-SC, el uso de los datos del segundo día de modelación es viable para el estudio paramétrico bajo las condiciones presentadas.
Alcanzar la independencia de la condición inicial permite obtener una mejor predicción del fenómeno de interés. Como se observó en la Fig. 4(b,c), el flujo de aire inducido en el segundo y tercer día de modelación fueron continuos en comparación al primer día de modelación. Seleccionar los resultados de una modelación del fenómeno sin haber alcanzado la independencia de la condición inicial significa realizar un análisis incorrecto del comportamiento térmico del sistema.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el análisis dinámico de un modelo de chimenea solar de un solo canal bajo las condiciones climáticas del día más cálido de un año típico de Hermosillo, Sonora. El modelo matemático de la ChSo-SC consideró los fenómenos de conducción a través de los elementos sólidos y el intercambio convectivo y radiativo con el medio que lo rodea; el modelo se formuló en estado transitorio y además de considerar el elemento metálico como pared absorbente, se consideró un elemento masivo al interior.

Se analizó la independencia de la condición inicial en el modelo matemático propuesto a partir de la extensión del tiempo de modelación (72 horas) y las condiciones de frontera. La temperatura de cada elemento y el flujo de aire inducido por la chimenea solar fueron empleados para el análisis de la condición inicial.

Las diferencias porcentuales mas altas se presentaron durante las primeras seis horas de modelación entre el primer y segundo día de modelación de hasta un 67.05% de diferencia porcentual en el flujo volumétrico. Estas diferencias descendieron a lo largo de los días de modelación. Los datos del segundo día presentan un comportamiento independiente de la condición inicial, ya que la variación de los resultados entre el segundo y tercer día son menores al 1.13%. Se demostró que alcanzar la independencia de la condición inicial permite tener mejores predicciones del flujo de aire inducido por las chimeneas solares con materiales masivos.
En estudios paramétricos, el análisis de la condición inicial debe realizarse a la par que el análisis de la independencia temporal para llevar a cabo un correcto estudio y diseño de estos sistemas pasivos con fines de ventilación y así obtener resultados satisfactorios.
En estudios futuros deben tomarse en cuenta los efectos de la humedad y la extensión del modelo a múltiples nodos en la zona interna de la pared absorbente para la evaluación de materiales masivos como los materiales de cambio de fase. Por lo que el análisis de la condición inicial es imprescindible para evitar fallos en la estimación de la ventilación generada y en el comportamiento térmico del sistema.

5. NOMENCLATURA

A	Área [m]
C_P	Calor específico [J/kgK]
Cd	Coeficiente de descarga [-]
g	Gravedad [m s^{-2}]
G_{solar}	Radiación solar [W/m^2]
Gr	Grashof [-]
$h_{conv\text{-}ext}$	Coeficiente convectivo exterior [W/m^2K]
h_{rad}	Coeficiente radiativo [W/m^{-2}K]
Hx	Distancia sobre eje x [m]
Hy	Distancia sobre eje y [m]
Hz	Distancia sobre eje z [m]
L	Longitud [m]
M	Flux de calor extraído por flujo de aire [W/ m^2]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]
Nx,Ny	Número de nodos [-]
Nu	Nusselt [-]
Pr	Prandtl [-]
Ra	Rayleigh [-]
T	Temperatura [°C]
t	Tiempo [s]
$\dot{V}$	Flujo volumétrico [m^3hr^{-1}]
x	Eje x [m]
y	Eje y [m]
z	Eje z [m]

Griegas

α^*	Absortancia [-]
α	Coeficiente de relajación [-]
β	Coeficiente de expansión volumétrica [K^{-1}]
Δ	Diferencia [-]
δ	Criterio de convergencia [-]
ε	Emitancia [-]
η	Eficiencia [-]
λ	Conductividad térmica [W/mK]
μ	Viscosidad dinámica [N s m^{-2}]
ν	Viscosidad cinemática [m^2 s^{-1}]
ρ	Densidad [kg/m^3]
ρ^*	Reflectancia [-]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann []
τ^*	Transmitancia [-]

Subíndices y superíndices

aislante	Aislante térmico
amb	Ambiente
conv	Convectivo
cond	Conductivo
ext	Exterior
f, fluido	Fluido al interior del canal
Int	Entrada
i	Elemento
Max	Maximo
New	Iteración actual
Old	Iteración anterior

ISSN en trámite

Out	Salida
placa	Placa metálica
rad	Radiativo
Sol	Solido
sky	Cielo
t	Tiempo
t-new	Tiempo actual
t-old	Tiempo anterior
vidrio	Cubierta de vidrio
wind	Viento

REFERENCIAS

Arce, J., Xamán, J.P., Alvarez, G., Jiménez, M.J., Enríquez, R., and Heras, M.R. (2013). A Simulation of the Thermal Performance of a Small Solar Chimney Already Installed in a Building. *Journal of Solar Energy Engineering*, 135, 011005-1 – 011005-10.

ASTM C578-01 (2002). *Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation*. ASTM Copyright.

Awbi, H.B. (2003). *Ventilation of buildings*. Spon Press, (primera edición).

Coldwell P.J., (2017). Balance Nacional de Energía 2017, *Secretaría de energía*.

Godoy-Vaca, L., Almaguer, M., Kastillo, J., Martínez, J., and Lobato-Cordero, A. (2017). Dynamic-physical model to predict the performance of a solar chimney in a warm-humid climate with different absorbent materials. *Proceedings of the 15th international building performance simulation association, USA*, 2069-2078.

Incropera, F.P, and DeWitt, D.P., (1996) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer,* John Wiley, (4ta edición).

International Energy Agency (2019), *Key World Energy Statistics*.

Jiménez-Xamán, C., Xamán, J., Gijón-Rivera, M., Zavala-Guillén, I., Noh-Pat, F., and Simá, E., (2020). Assessing the thermal performance of a rooftop solar chimney attached to a single room. *Journal of Building Engineering*, 31, 101380-101398, 2020.

Kaneko, Y., Sagara, K., Yamanaka, H., Kotani, T., and Sharma, S.D. (2006). Ventilation performance of solar chimney with built-in latent heat storage. *Proceedings od 10th international conf. On thermal energy storage, USA: ECOSTOCK*, 1-7.

Kumaran, M., (1996) *Final Report, Volume 3, Task 3: Material Properties*, International Energy Agency (primera edición).

Martí-Herrero, J., and Heras-Celemin, M.R. (2007). Dynamic physical model for a solar chimney. *Solar Energy*, 81, 614-622.

Ong, K.S. (2003). A mathematical model of a solar chimney. *Renewable Energy*, 28, 1047-1060.

Tlatelpa-Becerro, A., Rico-Martínez, R., Reynoso-Jardón, E., Urquiza, G., Castro-Goméz, L., Sanchéz, E., Ojeda, A., García, A., Sosa, A., and Luyando, U., (2019). Simulación numérica de una chimenea solar vertical con tres canales de flujo de aire. *Memorias del XXV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 1-5.

Zavala-Guillén, I., Xamán, J., Álvarez, G., Arce, J., Hernández-Pérez, I., and Gijón-Rivera, M., (2016). Computational fluid dynamics for modeling the turbulent natural convection in a double air-channel solar chimney system. *International Journal of Modern Physics C*, 27(8), 1650095-1 – 1650095-19.

ISSN en trámite

Análisis del efecto del material de cambio de fase en un destilador solar para clima semidesértico

S. Moreno*, C. Álvarez*, J. F. Hinojosa*, V. M. Maytorena*

**Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000 (e-mail: a214206165@unison.mx).*

Resumen: En el presente estudio se agregó una plancha de material de cambio de fase debajo de la vasija de un destilador solar, con el fin de aumentar la producción de agua. Se utilizaron las condiciones climatológicas de verano para Hermosillo, Sonora. Se presenta un modelo matemático, el cual consiste en un acoplamiento de las ecuaciones de energía y transporte de especies, para evitar el gran costo computacional requerido por un modelo multifásico. Se realizó una validación del modelo matemático, contra datos reportados en la literatura, obteniendo buen resultado. Se evaluaron 4 materiales de la empresa Rubitherm® (RT80 HC, RT70 HC, RT62 HC y RT54 HC), la diferencia entre ellos era el calor latente y la temperatura de cambio de fase. Con el destilador solar sin material de cambio de fase se obtuvo una producción de 4.53 kg/m^2, mientras que con el RT70 HC se mejoró a 5.13 kg/m^2, pero este material de cambio de fase no se fundió por completo. Se analizó también tres espesores del material de cambio de fase (1, 0.5 y 1.25 cm) y al disminuir el espesor de 1 a 0.25 cm la producción aumento a 5.42 kg/m2. Adicionalmente se analizó la eficiencia global del sistema, la cual mejoró de 55.78% hasta 66.70%, al agregar 0.25 cm del material RT70 HC.

Palabras clave: Destilador solar, PCM, modelo matemático, Desalinización, Energía solar.

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua es un problema que afecta a casi un tercio de la población mundial. Este problema se ha ido agravando por varios factores, como el crecimiento poblacional, las sequias o el mal uso del recurso.

Una forma de obtener agua limpia es por medio de la desalinización. El proceso más utilizado para la desalinización es la osmosis inversa, la cual tiene una gran desventaja, la cual es: operar bombas a presiones altas para así vencer la presión osmótica (Shatat, Worall and Riffat, 2013), esto conlleva una alta demanda de energía eléctrica, que proviene mayormente de quema de combustibles fósiles.

Debido a lo anterior es necesario buscar formas de lograr la desalinización utilizando fuentes renovables, una de ellas es la utilización de destiladores solares.

Los destiladores solares son dispositivos que funcionan con el principio del efecto invernadero. La configuración básica es en forma de caseta. Se compone de una bacinica que contiene el agua a destilar, una cubierta transparente que permite la entrada de radiación solar y paredes impermeables (Ayres, 1981).

La principal desventaja de los destiladores solares es su baja producción de agua. Por esto es importante investigar maneras de aumentar esta producción. Existen investigaciones al respecto, ejemplo de estas modificaciones son: el agregar enfriamiento a la cubierta, particiones en la bacinica del agua, aletas, material en forma de mecha, concentradores parabólicos o dispositivos de almacenamiento de energía (Omara *et al.*, 2020).

Los dispositivos de almacenamiento de energía más utilizados son de almacenamiento de calor sensible y de calor latente, siendo los de calor latente los que muestran mejor resultado, conocidos por sus siglas en inglés PCM.

Hay artículos que ya han analizado el sistema de destilar con PCM. (Vigneswaran *et al.*, 2019) estudiaron un sistema donde el PCM estaba encapsulado en tubos, y estos se ubicaban en el agua contenida en el destilador, analizaron tres casos: sin PCM, con un PCM en todos los tubos y con un PCM llenando los tubos de la izquierda y otro PCM en el resto de los tubos. Lograron un aumento en la producción de 3.68 a 4.40 kg/m^2, entre el caso 1 y caso 3.

(Mousa *et al.*, 2019) analizaron un parámetro R, que lo definieron como la masa de PCM entre la masa de agua,

ISSN en trámite

tomaron valores de 0.17, 0.35 y 0.51. Llegaron a la conclusión que R era inversamente proporcional a la producción durante el día y directamente proporcional a la producción durante la noche. En términos globales, cuando R tomó un valor de 0.17 la producción de todo el día tuvo un valor mayor.

Por lo anterior, el propósito de este trabajo es analizar la producción de un destilador solar al cual se le agrega una plancha de PCM debajo de la vasija de agua. Usando las condiciones ambientales de una ciudad con clima semidesértico como lo es Hermosillo, Son (Beck *et al.*, 2018). Se tomará como referencia un destilador que no contenga PCM.

2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

2.1 Descripción del problema físico

En el presente estudio se analiza un sistema de destilador solar con una sola inclinación, cuyas dimensiones del fondo son 75 x 75 cm, la parte más baja del destilador tiene una dimensión de 10 cm y un ángulo de inclinación de 30°, además el agua tiene una altura de 2 cm, por lo tanto, la altura efectiva del aire es 8 cm. La parte superior es un vidrio, el cual hace la función de cubierta, el grosor de este es 0.4 cm. La plancha de PCM se encuentra por debajo del agua, el espesor de esta plancha es un parámetro, se utilizan tres valores (1, 0.5 y 0.25 cm).

Las paredes laterales y la del fondo se encuentran aisladas térmicamente, mientras que el vidrio deja entrar la radiación solar y también se encuentra en contacto con la intemperie, por lo que se tienen perdidas de calor por convección y por radiación.

2.2 Modelo matemático

Para el modelo matemático se tomaron en cuenta ciertas consideraciones, como: una simplificación a un modelo bidimensional, el aire se modela como gas ideal, en el agua se aplica la aproximación de Boussinesq. En realidad, este modelo matemático no resuelve un modelo multifásico, esto se remplaza con un acoplamiento entre las ecuaciones de energía y de transporte de especies (Keshtkar, Eslami and Jafarpur, 2020). Las ecuaciones para el modelo matemático quedan escritas de la manera siguiente:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

Ecuación de momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\bar{\tau}_{eff}\right) + \rho \vec{g} \tag{2}$$

Ecuación de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{E}) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho \bar{E} + \bar{P})) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla \bar{T} - \sum_j \bar{h}_{E,j} \vec{J}_j) + S_h + S_L \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h + S_L \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h + S_L \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C p_{eff} T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h \tag{6}$$

Las ecuaciones (3)-(6) son para el aire, agua, vidrio y PCM, respectivamente. El aire se considera en régimen turbulento, mientras que el agua en laminar. Para tratar el cambio de fase en el PCM se seleccionó el método de la capacidad efectiva.

En la ecuación de energía, para el aire, agua y vidrio, 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:

$$S_h = \frac{\alpha_{rad}(I_{global})A}{V} \tag{7}$$

$$S_L = \frac{(1-\alpha)\dot{m}_c h_{fg,g} A_g - (1-\alpha)\dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_a} \tag{8}$$

$$S_L = -\frac{\alpha \dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_w} \tag{9}$$

$$S_L = \frac{\alpha \dot{m}_c h_{fg,g} A_g}{V_g} \tag{10}$$

Las ecuaciones 8, 9 y 10 son para el aire, agua y vidrio, respectivamente. En estas aparece el flujo másico de evaporación y condensación el cual permite acoplar la ecuación de energía con la distribución de especies.

ISSN en trámite

Adicionalmente, en el agua, 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 fracción de líquido se calcula indirectamente con la temperatura, esto se hace utilizando la siguiente forma:

$$f_l = \begin{cases} 0 & if\ T < T_s \\ \dfrac{T - T_s}{T_l - T_s} & if\ T_s < T < T_l \\ 1 & if\ T > T_l \end{cases} \tag{11}$$

La eficiencia global del sistema se define como un cociente entre la energía de condensación entre la energía solar que está recibiendo el sistema:

$$\eta_{global} = \frac{M_w h_{fg}}{A_g (I_{global})} \tag{12}$$

2.3 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se muestran en la Fig. 1, se puede ver que destilador se separó en cuatro dominios, la frontera que conecta cada dominio se modela como una pared acoplada, es decir toda la energía de un dominio pasa al otro y la temperatura es la misma en ambos lados.

En la parte superior se calculan las perdidas convectivas, con la temperatura ambiente y calculando un coeficiente de transferencia de calor convectivo (libre y forzada). Además, las perdidas radiativas con la temperatura del cielo y la emisividad del vidrio.

En el dominio del aire, las paredes que son frontera con el agua y el vidrio se consideran con humedad relativa del 100%. Se utilizan las ecuaciones (13)-(16) para encontrar la fracción másica en función de la temperatura, (evaluadas en la temperatura de cada pared). Con esto se logra el acoplamiento de la ecuación de especies con la de energía.

$$P_{sat}(T) = P_{cr}\left(10^{K\left(1-\frac{T_{cr}}{T}\right)}\right) \tag{13}$$

$$K = 4.39553 - 6.2442\left(\frac{T}{1000}\right) + 9.953\left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 5.151\left(\frac{T}{1000}\right)^3 \tag{14}$$

$$w = 0.622\frac{\varphi P_{sat}}{P - \varphi P_{sat}} \tag{15}$$

$$Y = \frac{1}{1 + \frac{1}{w}} \tag{16}$$

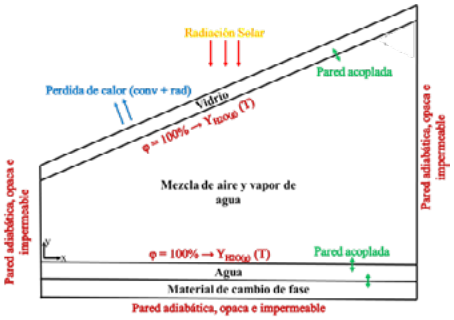


Fig. 1. Esquema físico y condiciones de frontera.

2.4 Metodología numérica

El modelo matemático se resolvió usando el software comercial ANSYS Fluent v15. Unas condiciones de frontera fueron agregadas por medio de una función definida por el usuario, la cual es programada en lenguaje C. En la Fig. 2 se muestra el diagrama de flujo utilizado.

Las propiedades del agua, aire y vidrio se tomaron al igual que en (Keshtkar, Eslami and Jafarpur, 2020). Para el PCM se obtuvieron de las hojas de datos, directo del sitio web de Rubitherm®.



Fig. 2. Diagrama de flujo de la solución numérica.

Se realizó un estudio de independencia de malla, las mallas tenían 75844, 50384 y 10232 nodos, la producción

ISSN en trámite

con cada una de ellas fue 5.13, 5.13 y 4.39 kg/m^2, respectivamente. Se consideró que la malla de 50384 nodos era independiente, debido a que tiene un error relativo de 0.02% con respecto a la malla de 75844 nodos. Además, se probó la independencia del tamaño de paso de tiempo con 5, 10 y 20 segundos, con estos pasos de tiempo se obtuvo una producción de 5.13, 5.13 y 4.17 kg/m^2. Se considera que 10 segundos de paso de tiempo es un tamaño adecuado. Ambas independencias se realizaron con el caso de un espesor de 1 cm del material RT70 HC, y con las condiciones ambientales de Hermosillo, Son para el día 21 de Junio.

3. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación de los modelos para el destilador y el PCM se hizo por separado, debido a la disponibilidad de datos experimentales o numéricos. Los resultados se muestran a continuación.

Primeramente, se validó el destilador, la comparación se hizo con los datos experimentales presentados por (Feilizadeh *et al.*, 2017). Ellos usaron un destilador solar sin PCM, con las mismas dimensiones del presentado en este trabajo, bajo las condiciones climáticas de Shiraz, India, es importante mencionar que el agua era agua limpia (sin sal). Esta comparación se muestra en la Fig. 3. Los resultados con el presente modelo manifiestan una subestimación promedio de 0.43 kg/m^2, durante el periodo de 12 a 23 h, pero reproduce el mismo comportamiento. A pesar de esto la producción al final del día es 5.58 y 5.62 kg/m^2, obtenida experimental y numéricamente, el error relativo entre estos valores es 0.76%.

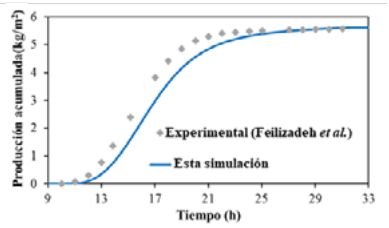


Fig. 3. Comparación de la producción acumulada.

El código del PCM fue verificado al comparar con los resultados numéricos de (Bouzennada *et al.*, 2021). Ellos estudiaron el efecto de inclinación de una cavidad con cambio de fase, la cavidad está calentada en una de las paredes y el resto adiabáticas, para compararlo se tomaron los datos cuando la cavidad está inclinada a 90°.

La comparación entre los modelos se observar en la Fig. 4, el comportamiento entre ambas curvas es bastante similar, de hecho, parecen estar empalmadas, hablando cuantitativamente la diferencia cuadrática media es 0.02.

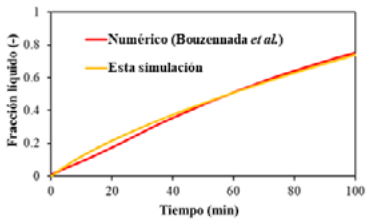


Fig. 4. Comparación de la fracción de líquido.

4. RESULTADOS

Se tomaron en cuenta las condiciones climatológicas del año solar típico de Hermosillo, Sonora para un 21 de junio (Altamirano-Carranza and Cabanillas, 2019). En la Fig. 5 se muestra la radiación solar global y la temperatura ambiente, adicionalmente, para la velocidad del viento se tomó un valor contante (3 m/s), ya que es la velocidad promedio en todo el día. La Fig. 6ª muestra la producción del destilador solar. Además, en la Fig. 6b se muestra la fracción de líquido, la cual nos ayuda a comprender el comportamiento de la producción. Estos datos son con 1 cm de espesor de PCM.

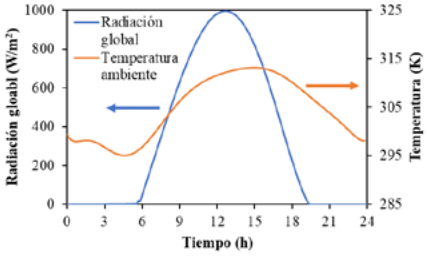


Fig. 5. Condiciones ambientales para el día 21 de junio en Hermosillo, Son.

La producción para el caso sin PCM y la del RT80 HC tienen el mismo comportamiento, solo se observa un desfase producido por el almacenamiento de calor. Este tipo de almacenamiento es solo calor sensible, ya que se puede observar que la fracción líquido se mantiene en 0.

Con el RT70 HC y RT62 HC se muestra un comportamiento parecido, ambos tienen un cambio de pendiente al mismo momento en que su fracción líquido

ISSN en trámite

aumenta, pero la producción por hora del RT62 HC se queda muy abajo, debido a la temperatura de cambio de fase.

El RT54 HC muestra comportamiento diferente a los otros PCMs, tiene dos cambios en la pendiente, el primero se presenta cuando se empieza a fundir, y lleva al momento de estar completamente fundido y en estado líquido aumenta su temperatura. Al momento de regresar energía al agua, primeramente, entrega calor sensible y posteriormente entrega calor latente. Esto se puede comprobar viendo el comportamiento de la fracción líquido.

Para obtener la producción acumulada se integra con respecto al tiempo la curva de producción por hora. La producción acumulada fue 4.53, 5.02, 5.13, 4.75 y 4.40 kg/m^2 para el caso sin PCM, RT80 HC, RT70 HC, RT62 HC, RT54 HC, respectivamente. Con RT70 HC se logró una mejora del 13.23%, pero vemos la fracción líquida del PCM solo llegó a 0.2. Por lo tanto, es interesante el fijar este PCM y hacer una disminución del PCM

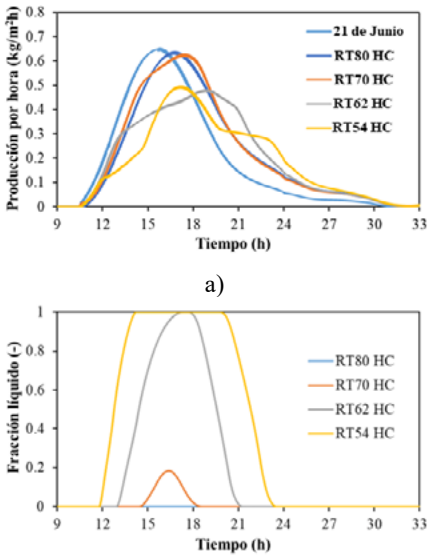


Fig. 6. Efecto de usar diferentes PCMs a) Producción por hora b) Fracción líquido.

La producción obtenida con diferentes espesores del PCM RT70 HC se presenta en la Fig. 7ª, así como, la fracción líquida se muestra en la Fig. 7b. Se puede observar que para espesores menores el PCM empieza a fundirse antes, esto debido a que su calentamiento para llegar a la temperatura de cambio de fase necesita menor energía por la menor cantidad de masa. Disminuir el espesor de 1 a 0.25 cm logró que la fracción de líquido aumentara de 0.2 a 0.94 lo cual hizo que se aprovecha mejor función de almacenar calor latente.

Para los casos con PCM, las curvas de producción por hora tuvieron el mismo comportamiento, pero para al tiempo que se disminuía el espesor el valor pico de la producción se aumentó.

La producción acumulada que se obtuvo fue 5.13, 5.33 y 5.42 kg/m^2 para los casos con 1, 0.5 y 0.25 cm, respectivamente. Esto significa un aumento del 19.58% de la producción con respecto al paso sin PCM.

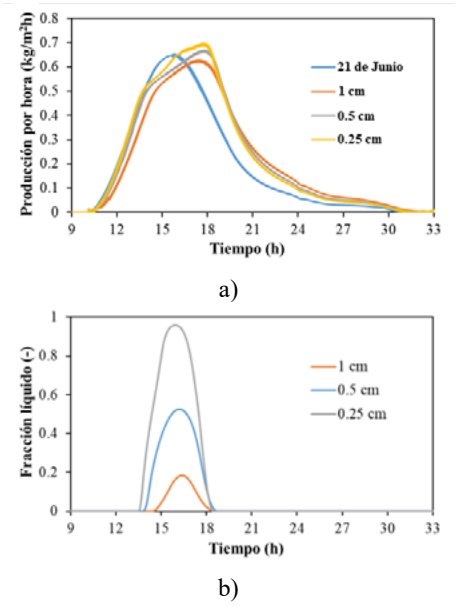


Fig. 7. Efecto de diferentes espesores de PCM a) Producción por hora b) Fracción líquido.

La Fig. 8 muestra los valores obtenidos para eficiencia global del sistema. El caso sin PCM tuvo una eficiencia del 55.78%, todos los casos menos el de RT54 HC, con eficiencia de 54.13%, lo superaron. El caso con mayor eficiencia (66.70%) fue el RT70 HC de 0.25 cm.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el efecto que tiene agregar un dispositivo de almacenamiento de calor latente en el fondo de un destilador solar. Se probaron 4 diferentes materiales de cambio de fase, todos ellos de la familia

ISSN en trámite

Rubitherm®, la principal diferencia de ellos es la temperatura de cambio de fase. Además, se usaron 3 diferentes espesores de este. De lo anteriormente presentado se puede concluir:

- El modelo matemático replica la producción acumulada (obtenida experimentalmente) con un error menor al 1%.
- El PCM RT70 HC es el que presenta mejor resultado, debido a que su temperatura de cambio de fase es la más adecuada para estas condiciones ambientales.
- El sobredimensionalizar el espesor de cambio de fase puede llevar a que no se funda por completo y no realicé su función de manera correcta.
- La eficiencia global del sistema fue mejorada con 3 de los 4 materiales de cambio de fase probados.
- La eficiencia global del sistema aumento desde 55.78% hasta un 66.70% al agregar el PCM y espesor más adecuado.

De manera general se puede concluir que agregar el PCM adecuado puede aumentar la producción del destilador hasta en un 19.58%.

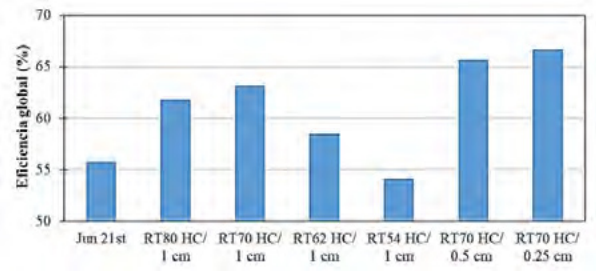


Fig. 8. Eficiencia global.

6. REFERENCIAS

Altamirano-Carranza, A. S. and Cabanillas, R. (2019) 'Generation of the Typical Meteorological Year (TMY) for the Solar Platform of Hermosillo , Sonora Cabanillas-López Introduc on', (November), pp. 0–1. doi: 10.13140/RG.2.2.15843.91681.

Ayres, J. (1981) *Solar Still.*, *Solar Energy Conversion II: Selected Lectures from the 1980 International Symposium on Solar Energy Utilization London, Ontario, Canada August 10–24, 1980*. Pergamon Press Canada Ltd. doi: 10.1016/b978-0-08-025388-6.50061-1.

Beck, H. E. *et al.* (2018) 'Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution', *Scientific Data*. The Author(s), 5, pp. 1–12. doi: 10.1038/sdata.2018.214.

Bouzennada, T. *et al.* (2021) 'Heat transfer and fluid flow in a PCM-filled enclosure: Effect of inclination angle and mid-separation fin', *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 124(April), p. 105280. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105280.

Feilizadeh, M. *et al.* (2017) 'Optimization of geometrical dimensions of single-slope basin-type solar stills', *Desalination*. Elsevier, (August), pp. 1–10. doi: 10.1016/j.desal.2017.08.005.

Keshtkar, M., Eslami, M. and Jafarpur, K. (2020) 'A novel procedure for transient CFD modeling of basin solar stills : Coupling of species and energy equations', *Desalination*. Elsevier, (November 2019), p. 114350. doi: 10.1016/j.desal.2020.114350.

Mousa, H. *et al.* (2019) 'Experimental study and analysis of solar still desalination using phase change materials', *Journal of Energy Storage*, 26(August). doi: 10.1016/j.est.2019.100959.

Omara, A. A. M. *et al.* (2020) *Phase change materials (PCMs) for improving solar still productivity: a review*, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/s10973-019-08645-3.

Shatat, M., Worall, M. and Riffat, S. (2013) 'Opportunities for solar water desalination worldwide: Review', *Sustainable Cities and Society*. Elsevier, 9, pp. 67–80. doi: 10.1016/J.SCS.2013.03.004.

Vigneswaran, V. S. *et al.* (2019) 'Augmenting the productivity of solar still using multiple PCMs as heat energy storage', *Journal of Energy Storage*. Elsevier, 26(August), p. 101019. doi: 10.1016/j.est.2019.101019.

7. NOMENCLATURA

A	Área (m^2)
a	Coeficiente de absorción térmica (1/m)
Cp	Calor específico (W/m K)
D_m	Coeficiente de difusión molecular (m^2/s)
E	Energía (W/m^3)
e	Emisividad (-)
fi	Fracción líquido del PCM (-)
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 absoluta (-)
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 (-)

ISSN en trámite

Enfoque novedoso para el análisis con dinámica de fluidos computacional de cargas aerodinámicas medias en heliostatos

R.L. Durán, J.F. Hinojosa, P. Sosa-Flores

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, pablo.sosa@unison.mx).

Resumen: Se presenta un estudio de dinámica de fluidos computacional sobre las cargas aerodinámicas en un heliostato debido a un flujo de capa límite atmosférica utilizando un modelo de turbulencia k-ε modificado. Una nueva formulación es utilizada, en la cual, las cantidades del modelo varían con el campo de velocidad. Se utilizaron funciones de pared modificadas en la parte inferior del dominio computacional para alcanzar la homogeneidad horizontal del flujo. Se observó buena homogeneidad horizontal para los perfiles de velocidad e intensidad turbulenta, así como para el esfuerzo cortante en el suelo. Se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos de arrastre, sustentación y volcamiento sobre el heliostato para diferentes ángulos de elevación, donde se observó buena concordancia respecto a valores experimentales obtenidos mediante túnel de viento reportados en la literatura especializada. Se realizó una comparación de los valores obtenidos utilizando esta formulación y el modelo k-ε estándar donde se aprecia una mejora significativa.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, capa límite atmosférica, heliostato, aerodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una tendencia global a migrar a tecnologías renovables de generación de energía. 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 plantas, podemos distinguir los sistemas solares de torre central, donde se hace uso de heliostatos para concentrar la radiación solar en un receptor ubicado en la parte superior de una torre. El campo de heliostatos representa aproximadamente el 30% del costo de construcción de este tipo de tecnologías (IRENA, 2010). El costo nivelado de la electricidad para un sistema solar de torre central puede reducirse hasta un 18% mediante la disminución de velocidad de diseño de los heliostatos (Emes *et al.*, 2015). Cuando los heliostatos están en operación, interactúan con el aire atmosférico, generando gradientes de presión en su superficie que ocasionan esfuerzos mecánicos y errores de seguimiento.

La parte inferior del aire atmosférico que interactúa con la superficie terrestre se le conoce como capa límite atmosférica. Para simular este tipo de flujo, son ampliamente utilizados los modelos de turbulencia de dos ecuaciones y viscosidad lineal basados en la promediación de Reynolds (RANS). Richards y Hoxey (1993) presentaron una solución analítica para las ecuaciones de momentum, energía cinética y disipación turbulenta basadas en la altura de rugosidad aerodinámica del suelo (z_0).

Actualmente, la mayoría de los softwares de dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizan la altura equivalente de rugosidad en granos de arena k_s (Nikuradse, 1933) para describir el comportamiento del flujo en las zonas cercanas a superficies rugosas. Numerosos estudios teóricos sobre la capa límite atmosférica han sido llevados a cabo utilizando funciones de pared del tipo k_s. Blocken *et al*. (2007) y Zhang (2009) mostraron en sus estudios las limitaciones del uso de este tipo de funciones de pared para aplicaciones de flujo atmosférico (problema de no homogeneidad horizontal, limitación $z_p>k_s$). Hargreaves y Wright (2007) en sus estudios teóricos propusieron utilizar funciones del tipo z_0 en combinación con funciones de pared estándar para realizar estudios donde el flujo atmosférico interactúe con algún tipo de obstáculo. Fang *et al*. (2009), Parente y Benocci (2010) mediante el uso de funciones de pared del tipo z_0, resolvieron el problema de la no homogeneidad horizontal en el dominio y la limitación $z_p>k_s$.

Parente *et al*. (2011) estudiaron teóricamente la interacción de una capa límite atmosférica que impacta un obstáculo utilizando un modelo k-ε modificado, donde implementaron funciones de pared del tipo z_0 en la parte inferior del dominio computacional, funciones de pared estándar en la superficie del obstáculo y valores variables para las cantidades C_μ y S_ε. Sus resultados mostraron buena concordancia con estudios experimentales en túnel de viento (CEDVAL A1-1, Leitl 1998).

Marais *et al*. (2015) estudiaron teóricamente las cargas aerodinámicas 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

ISSN en trámite

experimentales. Poulain *et al*. (2016) realizaron estudios numéricos sobre la separación de las facetas en heliostatos y su influencia en las cargas aerodinámicas, en el suelo del dominio computacional impusieron un esfuerzo cortante constante. Se observó una subestimación de los coeficientes entre el 18% y el 26%.

A la fecha existen numerosos estudios experimentales de cargas aerodinámicas en heliostatos, sin embargo, no se han encontrado estudios numéricos en la literatura que calculen correctamente las cargas medias debidas a un flujo de capa límite atmosférica horizontalmente homogénea. Los valores de las cargas medias son importantes, ya que permiten analizar diferentes orientaciones y geometrías de heliostatos. Aunque las cargas medias no describen completamente el fenómeno aerodinámico cuando se compara el comportamiento de las cargas medias vs cargas pico bajo diferentes ángulos de incidencia del viento, basados en estudios experimentales, se observa una tendencia cercana entre ambos tipos de cargas, mostrando diferencias principalmente en la magnitud (Peterka et al., 1989; Wu et al., 2010; Emes et al., 2019). Los coeficientes medios proporcionan información útil para analizar el efecto aerodinámico de diferentes formas de heliostatos. Una formulación con tiempo/recursos computacionales razonables y buena capacidad predictiva es necesaria. Por lo tanto, en este trabajo, una nueva formulación es utilizada. Funciones de pared modificadas del tipo z_0 se implementaron para asegurar la homogeneidad horizontal del flujo en el dominio en combinación con un modelo k-e modificado. Una mejora significativa fue encontrada utilizando esta nueva formulación.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1 Capa límite atmosférica sin perturbar

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:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \tag{1}$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_{\mu\ ABL}}} \tag{2}$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa(z + z_0)} \tag{3}$$

Estos perfiles corresponden a un flujo que no interactúa con obstáculos y son comúnmente utilizados como condición frontera de entrada en estudios aerodinámicos en CFD. La viscosidad turbulenta se expresa mediante (4) y debido a que se está utilizando el modelo k-ε, la asunción de flujo isotrópico es considerada (5).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

$$I_u = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{u} \tag{5}$$

La cantidad C_μ se calcula a partir de los valores de la velocidad de fricción del viento y la energía cinética turbulenta (6). El número de disipación turbulenta de Prantl se obtiene a partir de (7).

$$C_{\mu\ ABL} = \frac{u^{*4}}{k^2} \tag{6}$$

$$\sigma_{\varepsilon\ ABL} = \frac{\kappa^2}{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})\sqrt{C_{\mu\ ABL}}} \tag{7}$$

2.2 Funciones de pared estándar para superficies lisas

Para describir el comportamiento del viento cercano a superficies lisas, se hace uso de funciones de pared estándar. La velocidad adimensional se describe mediante (8), donde $\kappa \approx 0.4187$ es la constante de Von Kárman y el valor típico para la constante adimensional es $E \approx 9.79$.

$$U^*_{smooth} = \frac{1}{\kappa} ln(E y^*) \tag{8}$$

La distancia adimensional desde la pared se define mediante (9), el valor para Cμ en esta zona es el valor estándar del modelo k-ε, esto es: $C_{\mu\ std}=0.09$.

$$y^* \equiv \frac{\rho C^{1/4}_{\mu\ std} k^{1/2}_p y_p}{\mu} \tag{9}$$

2.3 Funciones de pared para superficies rugosas

Parente y Benocci (2010) propusieron simular implícitamente la rugosidad del suelo del dominio computacional mediante (10), donde se utilizaron de funciones de pared del tipo z_0.

$$\frac{u}{u^*_{rough}} = \frac{1}{\kappa} ln(E_{ABL} z^*_{ABL}) \tag{10}$$

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 (11). La altura adimensional se define mediante (12) y corresponde con $(z_p+z_0)/E_{ABL}$.

$$E_{ABL} = \frac{\mu}{\rho C^{1/4}_{\mu\ ABL} k^{1/2}_p z_0} \tag{11}$$

$$z^*_{ABL} = \frac{\rho C^{1/4}_{\mu\ ABL} k^{1/2}_p}{\mu} (z_p + z_0) \tag{12}$$

ISSN en trámite

2.4 Cantidades turbulentas en las superficies

La ecuación de la energía cinética turbulenta en las superficies no es resuelta, en su lugar, la condición (13) es impuesta. El cálculo de la disipación turbulenta se realiza mediante (14).

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \tag{13}$$

$$\varepsilon_p = \frac{C_{\mu\,ABL}^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa y_p} \tag{14}$$

Adicionalmente se introdujo un factor de corrección (15) en la ecuación (9), debido a limitación del software de solo poder asignar un único valor a la cantidad C_μ y para asegurar el valor de $C_{\mu\ std}$ en las superficies aerodinámicamente lisas. Las cantidades utilizadas en se muestran en la Tabla 1.

$$\theta = \left(\frac{C_{\mu\,std}}{C_{\mu\,ABL}}\right)^{1/4} \tag{15}$$

Tabla 1. Cantidades del modelo.

Cantidad	Valor	Cantidad	Valor
z_0	3.5x10^{-5} m	σ_k	1
u^*	0.5838 m s^{-1}	μ	1.7894x10^{-5} kg m^{-1} s^{-1}
k	3.2713 m^2 s^{-2}	ρ	1.225 kg m^{-3}
$C_{\mu\,std}$	0.09	γ	2
$C_{\mu\,ABL}$	0.01086	z_{ref}	0.167 m
$c_{\varepsilon 2}$	1.92	u_{ref}	11.8108 m s^{-1}
$c_{\varepsilon 1}$	1.44	A_{ref}	0.0126 m^2
$\sigma_{\varepsilon\,std}$	1.3	L_{ref}	0.1082 m
$\sigma_{\varepsilon\,ABL}$	3.5054	B_{ref}	0.1168 m

2.5 Generalización para el caso de un obstáculo en el flujo

Cuando un obstáculo (heliostato) es introducido en el sistema, el flujo es perturbado, por lo tanto (6) y (7) 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 (16) y (17) desde sus valores estándar ($C_{\mu\,std}$ y $\sigma_{\varepsilon\,std}$) del modelo k-ε en las zonas donde el flujo impacta al heliostato hasta los valores $C_{\mu\,ABL}$ y $\sigma_{\varepsilon\,ABL}$ en las zonas de flujo libre.

$$\delta = min\left(\left|\frac{|\boldsymbol{u}| - u_{log,ABL}}{u_{log,ABL}}\right|, 1\right) \tag{16}$$

$$\phi_{local} = \phi_{std} + (1 - \delta^\gamma)(\phi_{ABL} - \phi_{std}) \tag{17}$$

La ecuación (16) calcula la diferencia entre la velocidad local respecto a los valores de entrada en un flujo que impacta con un obstáculo, mientras que (17) calcula los valores locales de C_μ y σ_ε. La forma de esta transición está dada por γ.

$$\mu_t = \rho C_{\mu\,local} \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{18}$$

Como consecuencia de los cambios anteriores, la definición de la viscosidad turbulenta debe de ser modificada, como se muestra en (18).

2.6 Cargas aerodinámicas

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.

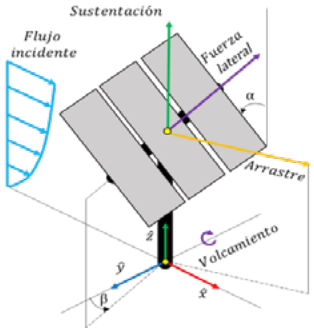


Figura 1. Sistema coordenado y coeficientes aerodinámicos.

$$Drag, Lift = \frac{F_{Drag,Lift}}{\frac{1}{2}\rho A_{ref} u_{ref}^2} \tag{19}$$

$$Overturning = \frac{M_{Overturning}}{\frac{1}{2}\rho A_{ref} L_{ref} u_{ref}^2} \tag{20}$$

3. CASOS DE ESTUDIO

Como primer requerimiento para desarrollar un estudio de cargas aerodinámicas, es necesario asegurar la 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 (1:20) 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 2) se impusieron los perfiles (1-3). 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 la condición de flujo de salida fue impuesta a la salida del dominio. El modelo matemático se resolvió utilizando el algoritmo SIMPLE para el acoplamiento presión-velocidad. El esquema de discretización *Standard* fue utilizado para la presión y el esquema de discretización *Second Order Upwind* fue utilizado en las ecuaciones de momentum, energía cinética turbulenta y disipación de energía cinética turbulenta. Cuatro

ISSN en trámite

pasos de tiempo distintos fueron utilizados (0.1 s, 0.15 s, 0.20 s y 0.25 s). Las simulaciones se llevaron a cabo hasta que se alcanzaba el estado estable. Como criterio de convergencia, se consideró un residual global menor a $1x10^{-6}$ para todas las ecuaciones de transporte.

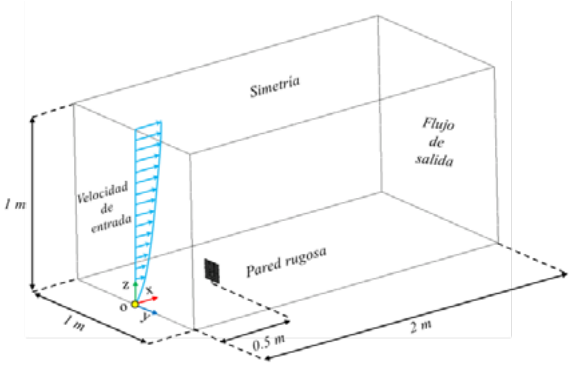


Figura 2. Dominio computacional.

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 (Figura 3) con una transición gradual a hexaedros a las regiones de flujo libre.

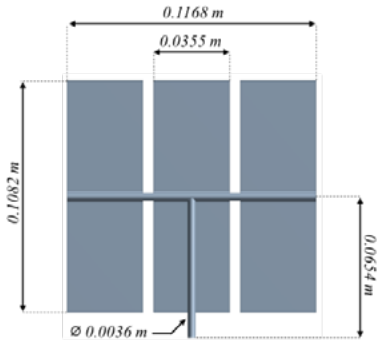


Figura 3. Dimensiones del heliostato.

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 (Figura 4). La malla 1 estaba conformada por ~2,676,716 elementos, la malla 2 por ~2,353,265, la malla 3 por ~2,032,088 y la malla 4 por ~1,747,568 elementos. Se comprobó que la variación de los coeficientes de arrastre (A), sustentación (S) y volcamiento (V) entre las distintas configuraciones de malla fuera menor a 1%. En la tabla 2 se muestra el estudio realizado.

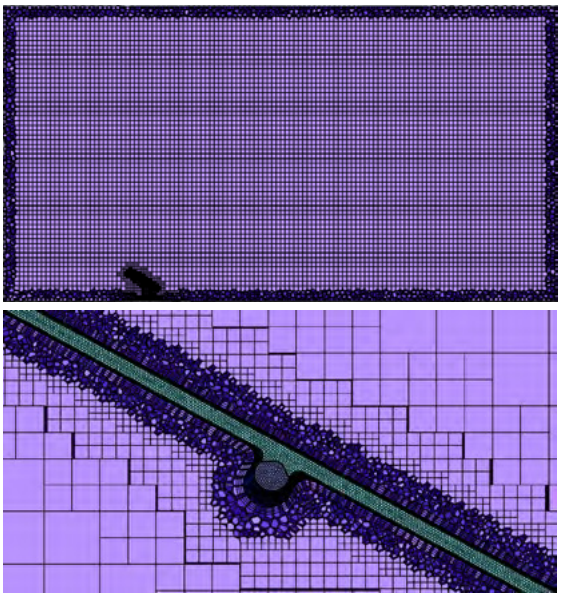


Figura 4. Vista lateral del mallado computacional.

Tabla 2. Estudio de independencia de malla.

Malla	C	Angulo de elevación (α)							
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	80°	84°
1	A	1.193	1.150	0.992	0.741	0.481	0.202	0.138	0.104
	S	0.013	0.290	0.539	0.669	0.685	0.421	0.282	0.173
	V	0.778	0.781	0.711	0.576	0.431	0.226	0.159	0.112
2	A	1.188	1.146	0.989	0.741	0.481	0.202	0.138	0.104
	S	0.013	0.289	0.537	0.668	0.683	0.420	0.281	0.172
	V	0.777	0.780	0.710	0.576	0.431	0.226	0.159	0.112
3	A	1.190	1.147	0.990	0.744	0.480	0.202	0.138	0.104
	S	0.013	0.289	0.538	0.671	0.682	0.419	0.281	0.172
	V	0.779	0.781	0.711	0.578	0.431	0.226	0.159	0.112
4	A	1.194	1.152	0.995	0.746	0.482	0.203	0.138	0.104
	S	0.013	0.290	0.541	0.673	0.684	0.419	0.281	0.172
	V	0.781	0.784	0.715	0.579	0.432	0.226	0.159	0.112

4. RESULTADOS

4.1 Capa límite atmosférica en un dominio vacío

En la Figura 5 se presentan los perfiles de velocidad e intensidad turbulenta en dirección del flujo. Se compararon los perfiles a la entrada e incidentes; la diferencia porcentual promedio para la velocidad fue de 0.22% mientras que para la intensidad turbulenta fue de 0.43%.

Un factor adicional que debe ser considerado es que estos perfiles también deben de mantenerse a lo ancho del dominio computacional. En la Figura 6 se muestran los perfiles de velocidad a intensidad turbulenta en dirección perpendicular al flujo. Para realizar un estudio de cargas aerodinámicas sobre un objeto que es impactado por un flujo de capa límite atmosférica, es necesario que la velocidad y la turbulencia se mantengan desde la entrada hasta la zona de incidencia. El presente estudio cumple con dicho requerimiento.

ISSN en trámite

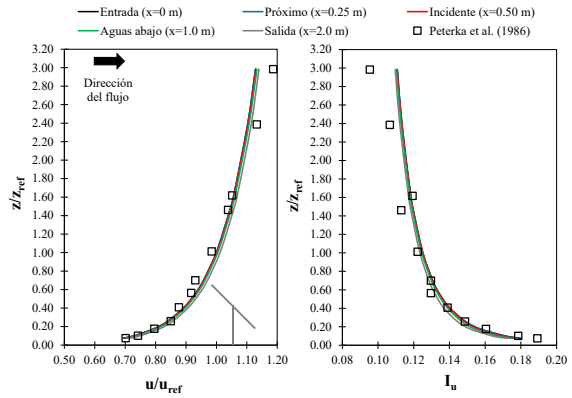


Figura 5. Perfiles de velocidad (izquierda) e intensidad turbulenta (derecha) en dirección del flujo.

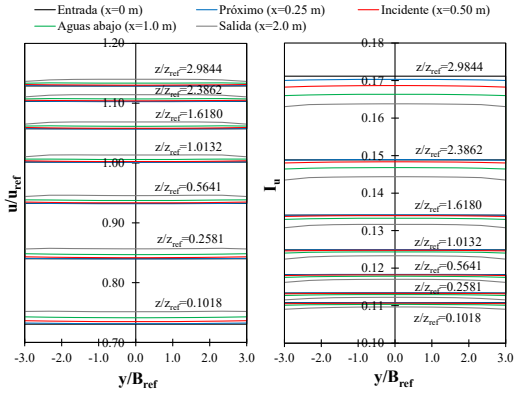


Figura 6. Perfiles de velocidad (izquierda) y perfiles de intensidad turbulenta (derecha) perpendiculares al flujo.

4.2 Estudio de cargas aerodinámicas

En la Figura 8 se muestran los coeficientes de arrastre, sustentación y volcamiento obtenidos en el presente estudio para diferentes ángulos de elevación. Se observa buena concordancia respecto a los valores experimentales mediante túnel de viento reportados en la literatura especializada.

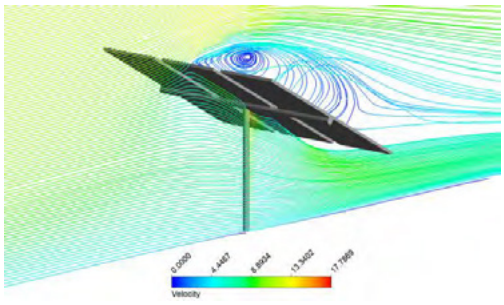


Figura 7. Patrón de flujo sobre el heliostato en α=60° y β=0°.

La comparación de los coeficientes aerodinámicos obtenidos y los reportados experimentalmente se muestra en las Tablas 3 y 4. El error promedio para las fuerzas de arrastre fue de 3.1% para los casos analizados, para la sustentación fue de 6.5% y para el volcamiento 6.0%. Se aprecia mejora significativa para el cálculo de coeficientes aerodinámicos utilizando esta formulación en comparación con estudios realizados únicamente con funciones de pared del tipo k_s y con valores constantes para C_μ y σ_ε (Caso k_s). En ese caso, los errores promedios para los coeficientes de arrastre, sustentación y volcamiento fueron 6.6%, 12.4% y 10.1%, respectivamente.

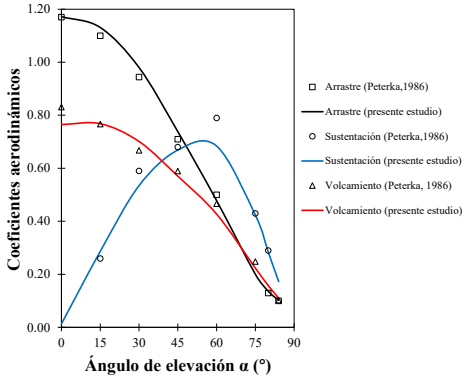


Figura 8. Coeficientes aerodinámicos obtenidos y los reportados por Peterka *et al.* (1986).

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)		
	A	S	V	A	S	V
0	1.172	0.014	0.765	1.17	-	0.83
15	1.131	0.287	0.768	1.10	0.26	0.77
30	0.980	0.535	0.701	0.94	0.59	0.67
45	0.738	0.669	0.570	0.71	0.68	0.59
60	0.478	0.684	0.427	0.50	0.79	0.47
75	0.200	0.423	0.223	-	0.43	0.25
80	0.136	0.283	0.157	0.13	0.29	-
84	0.102	0.173	0.110	0.10	-	0.10

Tabla 4. Comparación de los coeficientes aerodinámicos del caso k_s y los reportados por Peterka *et al.* (1986).

α (°)	Caso k_s			Peterka et al. (1986)		
	A	S	V	A	S	V
0	1.150	-	0.752	1.17	-	0.83
15	1.089	0.266	0.737	1.10	0.26	0.77
30	0.922	0.487	0.654	0.94	0.59	0.67
45	0.689	0.608	0.528	0.71	0.68	0.59
60	0.443	0.628	0.402	0.50	0.79	0.47
75	-	0.381	0.199	-	0.43	0.25
80	0.116	0.254	-	0.13	0.29	-
84	0.084	-	0.092	0.10	-	0.10

ISSN en trámite

Analizando los patrones de flujo para las distintas orientaciones se encontró que para el caso α=60° (donde ocurre la fuerza de sustentación máxima) el punto de estancamiento del viento ocurre en el borde superior de la estructura como se muestra en la Figura 7.

5. CONCLUSIONES

Se presenta un estudio numérico sobre las cargas generadas en un heliostato debido a un flujo de capa límite atmosférica utilizando un modelo de turbulencia k-ε modificado. Una nueva formulación es usada, en la cual funciones de pared modificadas para superficies rugosas fueron impuestas en la parte inferior del dominio computacional en combinación con valores variables para las cantidades C_μ y σ_ε.

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. El esfuerzo cortante en paralelo y perpendicular al flujo corresponde con los valores teóricos mediante el uso de esta formulación.
3. Buena concordancia se encontró entre los coeficientes aerodinámicos obtenidos y los experimentales utilizando valores variables para C_μ y σ_ε.
4. Se logró una mejora significativa utilizando esta nueva formulación en comparación con un modelo k-ε no modificado.
5. Esta formulación es útil para el cálculo de cargas aerodinámicas medias sobre geometrías planas debidas a una capa límite atmosférica isotrópica.

6. REFERENCIAS

Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. Atmospheric Environment, 47, 238-252.

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.

Fang, P., Gu, M., Tan, J., Zhao B., Shao, D., 2009. Modelling the neutral atmospheric boundary layer based on the standard k-ε turbulent model: modified wall functions. 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taiwan.

Hargreaves, D.M., Wright, N.G., 2007. On the use of the k-ε model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, 355-369.

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.

Leitl, B., 1998. Cedval at Hamburg University. www.mi.uni-hamburg.de/Cedval.

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.

Nikuradse, J., 1933. Laws of flow in rough pipes, 1292. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA).

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., 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., 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.

Richards, P.J., Hoxey, R.P., 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-e turbulence model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47, 145-153.

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.

Zhang, X., 2009. CFD simulation of neutral ABL flows. Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1688 (EN).

ISSN en trámite

Influencia del ranurado interno de un tubo receptor solar sobre la generación directa de vapor, deformación y esfuerzos térmicos

V.M. Maytorena, J.F. Hinojosa, S. Moreno

Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N,

Hermosillo, Sonora, CP 83000 (e-mail: victor.maytorena@unison.mx)

Resumen: En este trabajo se analiza una estrategia pasiva (ranuras) enfocada a reducir los gradientes térmicos que se generan en los tubos de receptores solares normales (lisos) y mejorar su estabilidad estructural. Se estudian dos tubos, uno liso (convencional) y uno ranurado para hacer una comparación. Los tubos estudiados representan a un receptor tubular externo de un sistema de torre central, que opera con generación directa de vapor (DSG), bajo un flux solar concentrado no uniforme con un valor máximo de 0.93 MW/m^2, un flujo másico subenfriado de 0.678 kg/s a 472 K y a una presión de 4.5 MPa. Se compararon los campos de temperatura, los gradientes térmicos de la pared del tubo, los estados de subenfriamiento y sobrecalentamiento, la detección del punto de inicio de la ebullición nucleada y de la generación neta de vapor, las deformaciones y los esfuerzos térmicos para cada sistema. Se encontró que el tubo ranurado reduce: los gradientes térmicos y la temperatura máxima en un 27% y 130 K, respectivamente, los esfuerzos térmicos en un 33%, las caídas de presión en 20% y mantiene la calidad de vapor en la salida (11%). Concluyendo que las ranuras generadas estratégicamente en el interior del tubo brindan una alternativa para operar con mayor seguridad estructural y eficiencia térmica el receptor tubular, sin comprometer la generación de vapor, lo que conlleva a un incremento de la durabilidad de estas tecnologías solares.

***Palabras clave**:* Tubo ranurado, Receptor solar externo, Torre solar, Generación directa de vapor, Estrés térmico, Deformación

1. INTRODUCCIÓN

Con el propósito de reducir los gases de efecto invernadero (GEI) y sus problemáticas ambientales asociadas, es necesario disminuir el consumo actual de los combustibles fósiles e implementar con mayor intensidad las diferentes tecnologías que aprovechan las energías renovables. La energía solar (ES), se considera una fuente energética alternativa con alto potencial en la generación de energía eléctrica limpia (Praveen *et al.*, 2018), y puede ser aprovechada mediante el uso de tecnologías de ES concentrada (CSP) o fotovoltaica (Awan, 2019). Las principales tecnologías de CSP son los sistemas de torre central, cilindro-parabólico, Fresnel lineal y disco-Stirling (González-Roubaud, Pérez-Osorio and Prieto, 2017). De estas tecnologías CSP, recientemente se ha encontrado que las plantas de potencia de Torre central, basadas con generación directa de vapor (DSG) han mostrado un potencial significativo como uno de los tipos más prometedores en CSP (Saghafifar, Mohammadi and Powell, 2020). La DSG consiste en hacer pasar el agua a través de los tubos receptores ubicados en el sistema receptor, estos absorben la energía solar concentrada generando un cambio de fase del agua, pasando de líquido a vapor saturado y posteriormente a vapor sobrecalentado. El vapor generado en el receptor puede alimentar directamente a la turbina de un ciclo de potencia Rankine (Prieto *et al.*, 2018). La naturaleza de esta forma de operar, conducen a significativos gradientes de temperatura entre las superficies externas e internas de los tubos receptores, además de presentar diferencias de temperaturas entre la superficie irradiada y la sombreada (adiabática), esto conlleva a la generación de estrés térmico y deformaciones en los receptores (Montoya *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2018; Maytorena *et al.*, 2021).

Con el propósito de incrementar la eficiencia térmica y disminuir los riesgos estructurales de los receptores tubulares, se han propuesto hoyuelos, ranuras y aletas en la superficie interna del tubo receptor (Bellos, Tzivanidis and Tsimpoukis, 2018; Bilal Awan *et al.*, 2020; Peng, Li and Liang, 2020). Considerando lo anterior, se propone estudiar la influencia del ranurado de un tubo convencional (liso), que pertenece a un receptor tubular de un sistema de torre central con generación directa vapor, con el propósito de disminuir las temperaturas del tubo receptor y los gradientes térmicos, mejorar el desempeño estructural de estas tecnologías e incrementar la durabilidad de estas tecnologías solares.

2. METODOLOGÍA

2.1. Definición del problema físico

Se seleccionó un tubo representativo de un receptor tubular externo que opera con DSG. El tubo receptor está fabricado en aleación HAYNES® 230® y tiene una longitud (L) de 10 m. El

ISSN en trámite

sistema base es un tubo sin alteraciones en su superficie interna (*Liso*), tiene un espesor de pared de 5mm (t) y un radio externo (r_o) de 12.7 mm. En la Fig. 1 se muestra una comparación entre el tubo liso y el tubo propuesto (ranurado). Las ranuras presentan una profundidad de 2 mm sobre la pared interna en el arco de $270° \geq \theta \leq 90°$. El tubo ranurado tiene un t_{min}= 3 mm con 3 bordes de 4 mm^2 transversales, los bordes pudieran operar como aletas longitudinales y dar soporte estructural, estos son equidistantes separados con $\Delta\theta = 45°$.

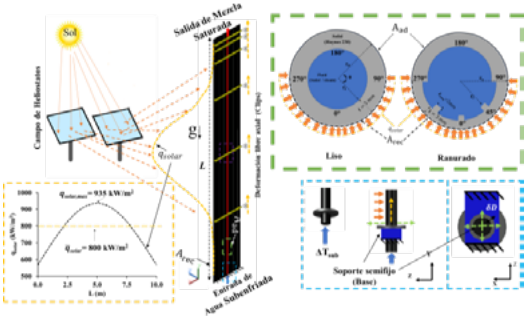


Fig. 1. Esquema del sistema físico: Receptor solar tubular y condiciones frontera.

El agua entra por la parte inferior de los tubos, con ΔT_{sub}=58 K a una presión de 4.5 MPa y un flujo másico de 0.678 kg/s. Se consideró un flux solar neto (q_{solar}) no uniforme con respecto a L y uniforme con respecto al área receptora (A_{rec}), el $\bar{q}_{solar}$=0.8 MW/m^2 con un valor máximo de 0.93 MW/m^2 en L=5 m (Fig. 1). Donde el A_{rec} es el 50% de la superficie total del tubo receptor, el resto se considera adiabático (A_{ad}). Los tubos estudiados son sujetados con 6 elementos de sujeción (clips) de 1" de longitud y 3" de largo con 2 mm de grosor. Estos son colocados en posiciones estratégicas en L (2.5 m, 5.0 m, 7.5 m, 9.0 m, 9.5 m, 9.75 m) en θ=180°. Los clips permiten que el tubo únicamente se desplace sobre su eje axial (Y) en los puntos de sujeción. El soporte de la base permite que el tubo se expanda térmicamente sin límite y le permita una deformación máxima de 2 mm (**δD**) en el plano ZX, además permite que las deformaciones del tubo solo ocurran en dirección del flujo, esto se muestra en la Fig. 1. Finalmente, el soporte superior solo restringe la deformación en la dirección Z. Las propiedades termofísicas del agua/vapor fueron tomadas de (Maytorena and Hinojosa, 2019a) y las propiedades mecánicas de (Maytorena *et al.*, 2021).

2.2 Modelos matemáticos, independencias de malla y algoritmos de solución.

Para el modelado de cambio de fase, se implementó un modelo bifásico euleriano, basado en las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía para cada fase (líquido y vapor). Además, se incorporó el modelo de ebullición de pared RPI modificado como término fuente, el cual representa el flujo de calor en la pared interna de los tubos, estos modelos se describen con detalle en (Maytorena and Hinojosa, 2019b). Por otro lado los modelos matemáticos para el análisis estructural, son basados en la suposición de un tubo cilíndrico hueco influenciado por los campos de temperaturas y los puntos de sujeción, estos se describen detalladamente en (Maytorena *et al.*, 2021). Los sistemas modelados son estudiados en geometrías 3D y en estado estable. Los modelos matemáticos se resolvieron con el software ANSYS FLUENT (CFD) y el software ANSYS Static Structural (FEA) v16.

2.3 Comparación con datos experimentales

La validación del cambio de fase se realizó con un experimento reportado por (Bartolemei and Chanturiya, 1967). Este consiste en una tubería de acero en arreglo vertical (lisa) con un $D_{i/o}$ de 15.4 mm/25.4 mm, L=2 m y un flujo de calor uniforme de 0.57 MW/m^2. El agua fluye por la parte inferior con un flux másico de 900 kg/m^{2}s (G) y ΔT_{sub}=60 K.

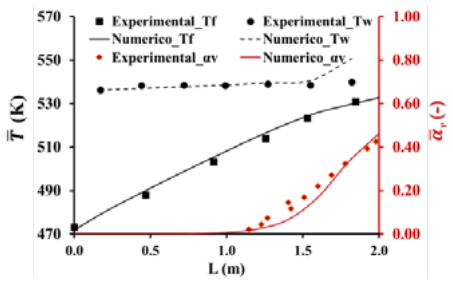


Fig. 2. Comparación entre los puntos experimentales y los perfiles numéricos de $\overline{\alpha_v}$ y $\overline{T_f}$.

La comparación entre los datos experimentales y los numéricos del fenómeno de cambio de fase se muestran en la Fig.2, donde se observa que la fracción volumétrica de vapor promedio ($\overline{\alpha_v}$) reproduce los valores y el comportamiento experimental, presentando un coeficiente de correlación R^2=0.98 (línea roja continua). En cambio, para las temperaturas medias del fluido ($\overline{T}_f$) los resultados numéricos (línea negra continua) presentan un mejor ajuste y comportamiento (R^2=0.99). Los datos experimentales para $\overline{\alpha_v}$ y la $\overline{T}_f$ fueron tomados de (Mali, Vinod and Patwardhan, 2017).

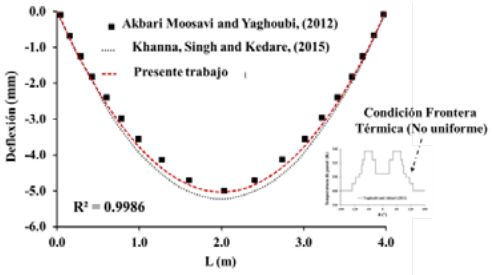


Fig. 3. Comparación entre los puntos experimentales y los perfiles numéricos para la deflexión del tubo receptor.

ISSN en trámite

Con respecto a las temperaturas de la pared interna del tubo (T_w), los datos experimentales fueron tomados de (Zhang *et al.*, 2018), los valores numéricos obtenidos (línea negra discreta) presentan una diferencia porcentual promedio menor al 1% y reproducen satisfactoriamente el comportamiento experimental. Por otro lado, en la Fig. 3 se presenta la validación del análisis estructural, para este caso se reprodujo el sistema experimental de (Akbari Moosavi and Yaghoubi, 2012). Los resultados numéricos presentaron una R^2 = 0.99, con respecto a los datos reportados por (Akbari Moosavi and Yaghoubi, 2012). Las condiciones del experimento se tomaron de (Khanna, Singh and Kedare, 2015).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ranuras del tubo liso aumentaron el área transversal de flujo en 21%, redujeron la masa del tubo en 12%, incrementaron su área interfacial en 46%, disminuyeron el G en 17% y la caída de presión en 20%. Los cambios en la geometría modifican el flujo, la fenomenología en la generación de vapor, los campos de temperatura y su estabilidad estructural. Enseguida se hace una comparación entre los dos receptores.

3.1 Efecto de las ranuras en el campo de temperaturas

Como primer análisis se presentan los contornos de temperatura para los dos receptores, estos son tomados en 4 planos transversales de L, cómo se ilustra en la Fig. 4. Ambos receptores presentan las temperaturas más altas en A_{rec}, y específicamente en θ=0°, los contornos manisfiestan como la temperatura del tubo disminuye en direccion al fluido y a través de sus paredes. Tambien se observa que las temperatuas del tubo y del fluido estan aproximadamente al mismo valor en la parte interna del tubo en θ=180°, para todas las posicones. De los dos receptores, el ranurado desarrolla las temperaturas mas bajas y mejora la distribucion de las temperaturas en la seccion adiabática, además controla la uniformidad en las temperaturas en la parte interna del tubo correspondiente al A_{rec}.

En la Fig. 5, se presentan los perfiles de las temperturas obtenidas en r_o y θ=0°, con respecto a L, para cada receptor (en negro). Estos perfiles muestran un aumento en la temperatura con respecto a L, llegando a una zona de valores máximos (T_{max}) para después descender. Las T_{max} obtenidas fueron alrededor de los 939 K y 807 K, en L ~ 7.47 m y 8.12 m, para el tubo liso y ranurado, respectivamente. En la Fig. 5, (en rojo), se grafican los perfiles de los gradientes de temperatura ($\Delta T/t$), que se desarrollan entre las temperaturas externas e internas del tubo en θ=0°. Se observa que los $\Delta T/t$, se reducen por la influencia de las ranuras, pasando de un $\Delta T/t_{,max}$ de 72 K/mm a 50 K/mm, y desplazando su aparición en L de 5 m y 7.8 m, para el tubo liso y ranurado, respectivamente. La reducción media relativa de los gradientes térmicos es del 27% aproximadamente.

Dos variables térmicas de interés en los fenómenos de ebullición son el ΔT_w y ΔT_{sub}. La ΔT_w indica el estado de sobrecalentmeiento con respecto a la temperatua de saturación (T_{sat}) en el que se puede encontrar la pelicula del fluido adherida a la pared interna del tubo. Por otro lado, ΔT_{sub} indica la temperatura por debajo de T_{sat}, es decir el estado de subenfriamiento del fluido. En la Fig. 6 se presentan los perfiles representativos de ΔT_w de cada receptor, generados a partir de las temperaturas máximas y mínimas interfaciales. Para el tubo liso, los perfiles se generaron con las T_f en r_i con θ=0° y 180°, mientras que, para el sistema ranurado, fueron en r=9.7 mm θ=11.25° y r=7.7mm θ=180°. Con respecto los ΔT_w orientados a A_{rec} (en rojo), se observa que el tubo ranurado supera T_{sat} en L=0.8 m, mientras que el tubo liso lo logra en L=1.5 m, lo que indica que el tubo ranurado entra en posibilidades de generar avapor a una menor distancia. En Ambos tubos una vez que el fluido llega al estado sobrecalentado, experimentan un incremento brusco en la temperatura, de ~7 K. Posteriormente se incrementa suavemente y llegan a un punto con un ΔT_w ~11K, a partir de este punto nuevamente se dispara su incremento hasta alcanzar un ΔT_w~55K, aquí experimenta un nuevo cambio de pendiente más grande hasta lograr sus valores máximos de 138 y 128 K, para el tubo liso y ranurado, respectivamente. Estos cambios de pendiente están correlacionados con la generación de vapor y los fenómenos ONB y NVG.

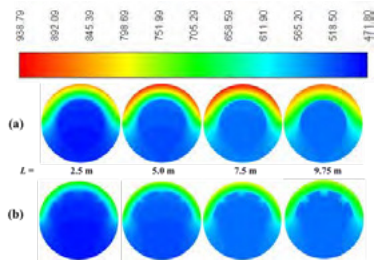


Fig. 4. Contornos de temperatura (K) para diferentes posiciones: tubo liso (a), tubo ranurado (b).

La zona ONB se le conoce como el inicio de la ebullición nucleada y se desarrolla en el lugar donde la temperatura del líquido en las proximidades de la pared calentada superan lo suficiente la T_{sat}, (Ahmadi, Ueno and Okawa, 2012).

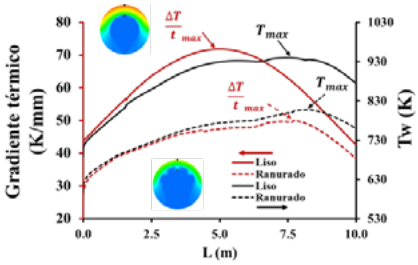


Fig. 5. Comparación entre los perfiles de las temperaturas máximas (Negro) y su gradientes térmicos (rojo).

Mientras que otro fenómeno importante inicia aguas arriba de la zona ONB, aquí hay un rápido incremento de la fracción

ISSN en trámite

volumétrica del vapor, a este fenómeno se le conose como la generación neta de vapor (NVG) (Ahmadi, Ueno and Okawa, 2012).

Con respecto los perfiles ΔT_w orientados a A_{ad} (Fig. 6 en negro), se observa que los valores ΔT_w máximos son aproximadamente de 3.4 K y 1.8 K, para el tubo liso y ranurado, respectivamente.

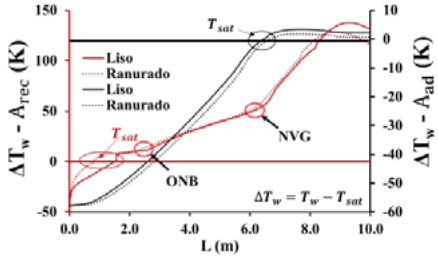


Fig. 6. Perfiles de ΔT_w orientados a A_{rec} y A_{ad}.

Adicionalmente se estimó un ΔT_w experimental robusto, con los datos mostrados en la Fig. 2, y se encontró que para estas condiciones de operación la ΔT_w mínima para generar la ebullición en la pared es de ~10K. Pudiendo concluir, que las paredes en la dirección de A_{rec} son las encargadas de la generación de vapor de las tecnologías CSP+DSG, convencionales, y que este potencial generativo de vapor se va diluyendo conforme nos alejamos de A_{rec}, alcanzando secciones de pared interna que no participan en la generación de vapor.

Para visualizar el estado de subenfriamiento de ambos sistemas, se presenta el ΔT_{sub} en el seno del fluido. Los perfiles son mostrados en la Fig. 7, mostrando la posición del receptor en donde el fluido logra la T_{sat}, pudiéndose interpretar como la posición del receptor en la que se desarrolla el fenómeno NVG. El tubo liso llegó a la saturación aproximadamente en L = 6.1 m, mientras que el ranurado a los 6.4 m.

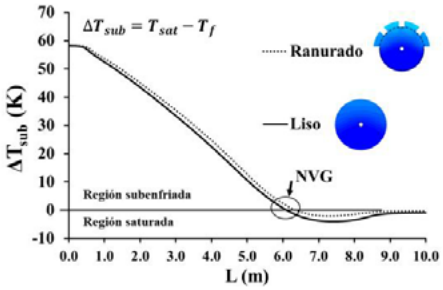


Fig. 7. Perfiles de ΔT_{sub}.

3.2 Efecto de las ranuras en la generación directa de vapor

En la Fig. 8 se presentan los contornos de las α_v para ambos sistemas. De manera general se observa que para todos los planos estudiados, las α_v más altas se desarrollan en la pared orientada a A_{rec} y los valores mínimos en las cercanías de la pared orientada a A_{ad}, esto se complementa con los puntos anteriores donde se sospecha que la pared interna de A_{ad} una vez alcanzada la T_{sat} esta solo funciona como un contenedor de vapor, es decir no participa en la generación de vapor, pero tampoco participa en la condensación de las burbujas. De manera particular se observar que el caso ranurado en los planos estudiados desarrolla α_v más altas, con respecto al caso liso.

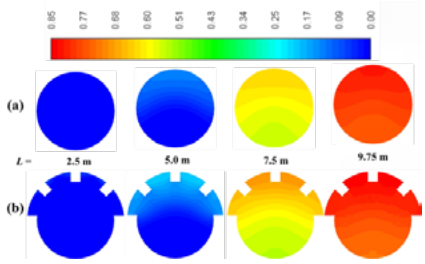


Fig. 8. Contornos de α_v para diferentes posiciones (-): tubo liso (a), tubo ranurado (b).

La Fig. 9 nos ayuda a encotrar la primera región donde se desarrolla el fenómeno ONB para cada sistema, aquí se comparan los perfiles de la α_v en la pared interna en puntos estratégicos de cada sistema. Como se puede observar el caso ranurado llega primeramente al fenómeno ONB, como se sospechaba con la variable ΔT_w. Las modelaciones indican que el caso ranurado comienza a generar vapor alrededor de los 1.5 m, mientras que el tubo liso alrededor de los 2 m. Ambos sistemas desarrollaron aproximadamente la misma α_v maxima ~0.82.

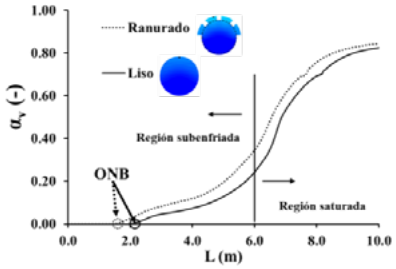


Fig. 9.Comparación de los perfiles de la α_v en la pared interna.

Finalmente se hace una comparación de la $\overline{\alpha_v}$ y sus correspondientes $\overline{X_v}$, a manera de perfiles mostrados en Fig. 10. Se aprecia que ambos receptores presentan un comportamiento promedio equivalente, aunque localmente sean distintos, como se ha discutido anteriormente. La $\overline{X_v}$ y $\overline{\alpha_v}$ máximas obtenidas por los sistemas son de 0.11 y 0.8, aproximadamente. Como análisis adicional, se colocan las topologías de flujo según las clasifican (Li *et al.*, 2011). En la Fig. 10, se señala que aproximadamente para L > 8.5 m, el flujo bifásico en ambos sistemas presentan una topología de tipo niebla (mist flow), esta

ISSN en trámite

topología se caracteriza por presentar una fase líquida dispersa en forma de pequeñas gotas en un flujo de vapor continuo. La velocidad media en la salida del sitema para la fase de vapor fue de 24.8 m/s y 20.5 m/s, para el caso liso y ranurado, respectivamente. Aunque ambos sistemas mantuvieron el mismo coeficiente de deslizamiento de fase ($\boldsymbol{S} = v_v/v_L$) de 1.24.

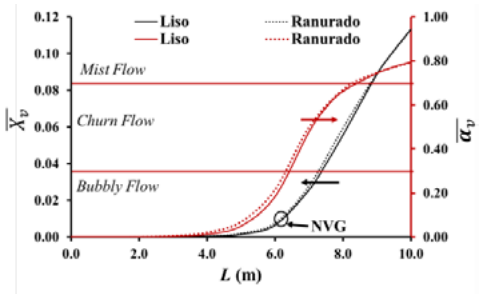


Fig. 10.Comparación de los perfiles de la $\overline{X_v}$ y la $\overline{\alpha_v}$.

3.3 Deformaciones y esfuerzos térmicos

Con los campos de temperaturas de los tubos estudiados y los puntos de sujeción (clips y soportes) y con las restricciones en las deformaciones permitidas se procede al análisis estructural. En la Fig. 11, se presenta una comparación de la deformación direccional en Z, esta información es tomada de la superficie externa del tubo en r_0 y θ=0°, como se señala con la línea amarilla. los resultados indican que ambos sistemas presentan ligeras deformaciones, en relación a L. Las deformaciones máximas obtenidas son de 0.25 cm y se dan en la dirección de θ=180° en L~6.4, lo que equivale al 0.03% con respecto a la longitud total. Otro punto interesante es que en los puntos de sujeción la variable analizada muestra valores > 0, estos resultados probablemente se deban por los efectos de las expansiones térmicas en esos puntos de muestreo, como se señalan en las Fig. 4 y 5, donde las temperaturas en estos puntos rondan entre los 720K y 940K, aproximadamente.

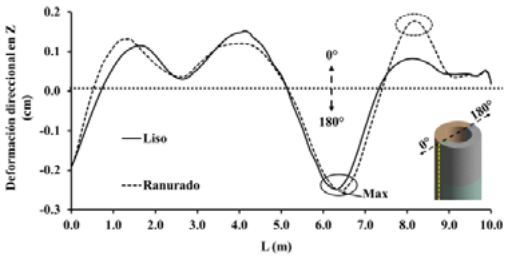


Fig. 11. Comparación de la deformación direccional Z.

Finalmente se hace una comparacion de los esfuerzos térmicos (von-Mises), de los tubos estudiados (Fig. 12). Los valores presentados en la Fig. 12, corresponden a valores promedios tomados a las alturas de los Clips, en r_0 y θ = 0°. Los valores de Ultimate Tensile Strength (**UTS**) y Yield Strength (**YS**) fueron evaluados a una temperatura de 450°C (Hrutkay and Kaoumi, 2014). Los dos sistemas superan el valor de **YS**, por lo que se espera que las deformaciones desarrolladas se conserven. Los resultados revelan que el tubo liso supera el valor de **UTS** en L=5 m. Este resultado indica que el tubo puede fallar en esta sección, pudiendo manifestar grietas, ranuras, etc., además el sistema liso operaría al limite del punto **UTS** en toda esa sección del tubo (769 MPa), por lo que no es recomendable utlizar un grosor de 5 mm para esta aplicación. Por otro lado, el tubo con ranuras brinda una reducción media relativa del 33% de los esfuerzos térmicos con respecto al tubo liso, con un valor medio de 515 MPa, lo que genera un factor de seguridad de 1.55 con respecto a la **UTS**.

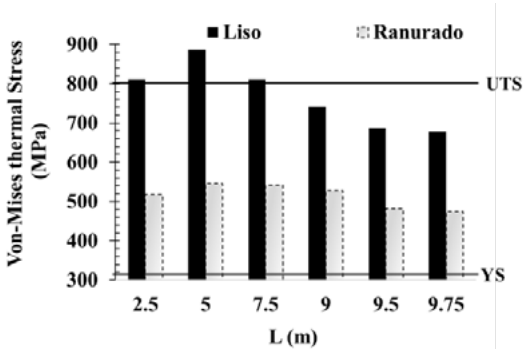


Fig. 12. Comparación de los esfuerzos térmicos en r_0 y θ=0°, tomados a las alturas de los clips.

4. CONCLUSIONES

La estrategia global del modelado, es confiable para predecir el comportamiento de cambio de fase, térmico, hidrodinámico y estructural de los receptores tubulares propuestos bajo estas características.

El tubo ranurado es una alternativa confiable para operar con mayor seguridad estructural el receptor tubular bajo las condiciones de operación estudiadas, sin comprometer la generación de vapor. Además, reduce las temperaturas en el tubo receptor, lo que generaría mayor eficiencia térmica, al reducir las pérdidas de energía por radiación y convección, en un sistema real. Ademas mejoraria las propiedades mecánicas del material, lo que significa mayor seguridad estructural. Las simulaciones mostraron que ambos receptores generan la misma cantidad de vapor, aunque dado que el q_{solar} es neto e igual para ambos sistemas, probablemente el sistema ranurado en la realidad genere mayor vapor, bajo las misma condiciones. Implementar estrategias pasivas que ayuden a la reducción de los gradientes de temperatura, se reflejarán en la reducción de los esfuerzos térmicos. Por otro lado, las deformaciones del sistema pueden controlarse casi en su totalidad con un buen diseño y adecauda ubicación de los clips o tecnologias similares. Tambien se encontro que las paredes internas del tubo alejadas del q_{solar}, no

ISSN en trámite

participan en la generación de vapor, esta es una oportunidad para mejor los sistemas receptores actuales que operacon con DSG.

5. REFERENCIAS

Ahmadi, R., Ueno, T. and Okawa, T. (2012) 'Bubble dynamics at boiling incipience in subcooled upward flow boiling', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 488–497. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.09.050.

Akbari Moosavi, S. M. and Yaghoubi, M. (2012) 'Three Dimensional Thermal Expansion Analysis of an Absorber Tube in a Parabolic Trough Collector', *Mechanical Engineering*, (February 2022), pp. 0–7.

Awan, A. B. (2019) 'Performance analysis and optimization of a hybrid renewable energy system for sustainable NEOM city in Saudi Arabia', *Journal of Renewable and Sustainable Energy*.

Bartolemei, G. G. and Chanturiya, V. M. (1967) 'Experimental study of true void fraction when boiling subcooled water in vertical tubes', *Thermal Engineering*, pp. 123–128.

Bellos, E., Tzivanidis, C. and Tsimpoukis, D. (2018) 'Enhancing The Performance Of Parabolic Trough Collectors Using Nanofluids And Turbulators', *Science Trends*. doi: 10.31988/scitrends.21596.

Bilal Awan, A. *et al.* (2020) 'Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements', *Solar Energy*, pp. 1422–1458. doi: 10.1016/j.solener.2020.09.072.

González-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D. and Prieto, C. (2017) 'Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 133–148. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.084.

Hrutkay, K. and Kaoumi, D. (2014) 'Tensile deformation behavior of a nickel based superalloy at different temperatures', *Materials Science and Engineering A*, pp. 196–203. doi: 10.1016/j.msea.2014.01.056.

Khanna, S., Singh, S. and Kedare, S. B. (2015) 'Explicit expressions for temperature distribution and deflection in absorber tube of solar parabolic trough concentrator', *Solar Energy*, pp. 289–302. doi: 10.1016/j.solener.2015.01.044.

Li, H. *et al.* (2011) 'Prediction of Boiling and Critical Heat Flux Using an Eulerian Multiphase Boiling Model', pp. 463–476. doi: 10.1115/IMECE2011-65539.

Mali, C. R., Vinod, V. and Patwardhan, A. W. (2017) 'Comparison of phase interaction models for high pressure subcooled boiling flow in long vertical tubes', *Nuclear Engineering and Design*, pp. 337–359. doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.09.010.

Maytorena, V. M. *et al.* (2021) 'Analysis of the direct steam generation, thermal stresses, and deformations in a tubular receiver of a solar tower', *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(5). doi: 10.1063/5.0066123.

Maytorena, V. M. and Hinojosa, J. F. (2019a) 'Effect of non-uniform concentrated solar flux on direct steam generation in vertical pipes of solar tower receivers', *Solar Energy*, pp. 665–676. doi: 10.1016/j.solener.2019.03.047.

Maytorena, V. M. and Hinojosa, J. F. (2019b) 'Three-dimensional numerical study of direct steam generation in vertical tubes receiving concentrated solar radiation', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 413–433. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.101.

Montoya, A. *et al.* (2018) 'Numerical model of solar external receiver tubes: Influence of mechanical boundary conditions and temperature variation in thermoelastic stresses', *Solar Energy*, pp. 912–922. doi: 10.1016/j.solener.2018.09.068.

Peng, H., Li, M. and Liang, X. (2020) 'Thermal-hydraulic and thermodynamic performance of parabolic trough solar receiver partially filled with gradient metal foam', *Energy*. doi: 10.1016/j.energy.2020.119046.

Praveen, R. P. *et al.* (2018) 'Performance analysis and optimization of a parabolic trough solar power plant in the middle east region', *Energies*, 11(4), pp. 1–18. doi: 10.3390/en11040741.

Prieto, C. *et al.* (2018) 'Thermal energy storage evaluation in direct steam generation solar plants', *Solar Energy*, pp. 501–509. doi: 10.1016/j.solener.2017.11.006.

Saghafifar, M., Mohammadi, K. and Powell, K. (2020) 'Design and analysis of a dual-receiver direct steam generator solar power tower plant with a flexible heliostat field', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. doi: 10.1016/j.seta.2020.100698.

Wan, Z. *et al.* (2018) 'Numerical study on thermal stress and cold startup induced thermal fatigue of a water/steam cavity receiver in concentrated solar power (CSP) plants', *Solar Energy*, pp. 430–441. doi: 10.1016/j.solener.2018.05.087.

Zhang, X. *et al.* (2018) 'Investigation on the Subcooled Boiling in Vertical Pipe With Uncertainties From Boundary Conditions by Using FLUENT', *Frontiers in Energy Research*, 6. doi: 10.3389/fenrg.2018.00023.

ISSN en trámite

Efecto de la geometría trasera de un helióstato en reposo sobre las cargas aerodinámicas

P. Sosa-Flores, J.F. Hinojosa, R.L. Durán

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, pablo.sosa@unison.mx).

Resumen: El estudio de los coeficientes de carga de helióstatos en posición de reposo es relevante en el proceso de diseño mecánico y estimación de costos de las plantas termosolares de Torre Central. Cuando un helióstato está en posición de reposo, en la presencia de un flujo de viento de alta velocidad, se presentan desequilibrios de presión significativos entre la superficie superior e inferior. Este artículo presenta un estudio computacional de simulación de remolinos grandes (LES) para cuatro geometrías diferentes de la parte trasera de un helióstato cuadrado con una inclinación horizontal. Se analiza el efecto sobre las magnitudes de los coeficientes de momento en el eje de elevación (C_{MHy}), de arrastre (C_{Fx}) y de volcamiento (C_{My}). Los resultados muestran cómo las diferencias en las formas y las proporciones de tamaño entre las secciones delantera y trasera del helióstato afectan los coeficientes de carga aerodinámica (ALC) en posición de reposo. También se observó que la relación entre la longitud de la cuerda y la distancia vertical máxima desde la superficie posterior del espejo hasta el punto más lejano de la geometría de la estructura del helióstato está directamente relacionada con las variaciones de ALC para los helióstatos analizados.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, capa límite atmosférica, helióstato, aerodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

En las plantas termosolares de Torre Central (PTSTC), los helióstatos son componentes fundamentales, tanto por su función en el funcionamiento de la instalación como por la participación porcentual que representan estos elementos, que puede llegar al 40% de la inversión de la planta (Kolb *et al.*, 2007). Sin embargo, el diseño de los componentes mecánicos y estructurales de un helióstato está directamente relacionado con las condiciones atmosféricas del lugar donde se pretende que opere el helióstato, más específicamente con las velocidades máximas del viento atmosférico y las intensidades de turbulencia registradas en ese lugar. Cuanto mayores sean las velocidades del viento consideradas para el diseño, mayores serán los costos dedicados para helióstatos más rígidos y robustos (Emes *et al.*, 2015; Emes *et al.*, 2020a).

Para cualquier planta PTSTC, cuando la velocidad sostenida del viento supera una cierta magnitud, los helióstatos deben adoptar la posición de reposo para reducir su área frontal en contra de la dirección del viento. Casi todos los coeficientes medios de carga aerodinámica se reducen a su mínimo absoluto (Peterka *et al.*, 1989). Las cargas desarrolladas por el flujo del viento son proporcionales a la magnitud cuadrada de la velocidad del viento. Por lo tanto, incluso en una posición de reposo, las cargas de viento pueden ser mayores durante las condiciones de tormenta, proporcionando el escenario más crítico para el mecanismo de accionamiento de elevación del helióstato y el dimensionamiento de la base. Deben estar diseñados para superar cualquier carga máxima desarrollada por el desequilibrio de presión a lo largo de las secciones frontal y trasera de las superficies reflectantes (espejos y sus estructuras de soporte) (Emes *et al.*, 2020b).

En la literatura, se han reportado diferentes estudios sobre el efecto de las cargas de viento en helióstatos en posición de reposo. Sin embargo, ninguno de los autores menciona detalles de la forma y dimensiones de la sección trasera del modelo de helióstato utilizado como factor relevante para influir en el comportamiento de los ALC. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este estudio es determinar, mediante la comparación de los resultados de carga aerodinámica para las geometrías de helióstatos aquí analizadas, si es necesario o no establecer lineamientos con respecto a las formas traseras de los modelos experimentales a escala utilizados para predecir el ALC presente en helióstatos en reposo. Se obtuvieron resultados numéricos con un modelo de simulación de remolinos grandes (LES), usando un helióstato cuadrado en la posición de almacenamiento en diferentes ángulos de orientación azimutal (β). El efecto de tener cuatro geometrías diferentes de la sección trasera (inferior) del helióstato se analizó mediante la comparación de los coeficientes de momento en el eje de elevación (C_{MHy}), de arrastre (C_{Fx}) y de volcamiento (C_{My}). Además, se obtuvieron campos de presión y líneas de corriente de aire alrededor de las superficies frontal y posterior del helióstato, mostrando cómo las diferencias en las geometrías generaban desequilibrios de presión variables para cada caso estudiado. Comparando los tipos de helióstatos a

ISSN en trámite

través de su comportamiento de flujo de aire y sus magnitudes resultantes del coeficiente de fuerza de arrastre media y máxima, el coeficiente de momento de volcamiento y el coeficiente de momento del eje de elevación.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Un helióstato a escala 1:20 se somete a una corriente de viento de capa límite atmosférica (Figura 1). Este modelo tiene una superficie cuadrada plana horizontal (α=0°) de 100 mm de lado (L). La altura de la línea central del helióstato (HCL) es de 68,58 mm. Se compararon diferentes tipos de helióstatos; las características geométricas de los componentes de la estructura de soporte del espejo y el grosor del espejo variaron en forma y proporciones. Para cada uno de los casos estudiados, el helióstato se gira en pasos de 45° sobre su eje vertical z (rotación azimutal). Por lo tanto, el ángulo de orientación del viento (β), toma cinco valores diferentes desde 0° hasta 180°; donde 0° significa que la dirección del viento es perpendicular al eje de elevación del helióstato y al borde de ataque del espejo.

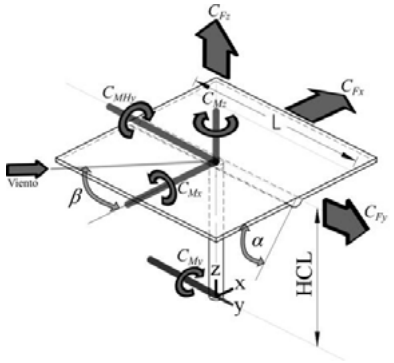


Figura 1. Vista esquemática del modelo de helióstato y notación de los ángulos de rotación para cada eje.

Se compararon cuatro geometrías traseras de helióstatos diferentes a través de su coeficiente de momento en el eje de elevación resultante (C_{MHy}). El efecto de modificar el flujo de viento en la parte inferior del helióstato se analizará a través de la magnitud de este coeficiente. Además, se obtuvieron y compararon los coeficientes de arrastre (C_{Fx}) y de volcamiento (C_{My}). Se consideraron dos tipos de estructuras de soporte del espejo: un tubo de torsión perpendicular al pedestal del helióstato, formando una estructura en forma de T; y el otro es un componente delgado en forma de caja que representaría un soporte estructural cuadrado sólido para el espejo.
La Tabla 1 muestra la sección transversal de los cuatro tipos de helióstatos considerados. En las imágenes, la parte horizontal larga es el espejo, y los cuerpos debajo son elementos de soporte. La longitud del espejo (L) siempre es de 100 mm, por lo tanto, todos los tipos presentan la misma área de espejo. En el Tipo A, el espejo está sostenido por un tubo de torsión con una porción de forma cilíndrica (diámetro = 8 mm) que sobresale de la superficie inferior del espejo (el 30% del diámetro del cilindro está expuesto). El tipo B también tiene un tubo de torsión de cilindro (diámetro= 6 mm) como soporte. Ambos tipos, A y B, poseen espejos de 2 mm de espesor; la principal diferencia es que, en B el 100% de la circunferencia del cilindro queda expuesta (se aplicaron filetes cerca de la unión de la tubería con el espejo). El tipo C y el tipo D tienen una forma similar y tienen un soporte en forma de caja. En el Tipo C, el grosor del espejo y las dimensiones laterales de la caja son más prominentes que en el D. Siendo el espejo de 1 mm para C y 0.5 mm para D; además, este último tiene un área de espejo sin soporte más grande que el Tipo C ya que los voladizos de C son de 4 mm y de 10 mm en D.

Tabla 1. Secciones transversales de los helióstatos estudiados.

Tipo	Sección transversal
A	
B	
C	
D	

3. MODELO MATEMÁTICO

Para el análisis computacional se utilizó la estrategia de Simulación de Remolinos Grandes (LES). La naturaleza del problema físico estudiado y los datos que se pretenden obtener requieren que el modelo de turbulencia sea capaz de resolver el efecto de los vórtices formados en la corriente de viento de la capa límite atmosférica. Utilizando el modelo LES, se obtuvo información de las fuerzas máximas (por lo tanto, ALC), la magnitud y la frecuencia de las variaciones de la velocidad del viento. El modelo LES resuelve directamente las escalas de gran tamaño y filtra de la ecuación de Navier-Stokes las escalas más pequeñas que son las que disipan la energía cinética de turbulencia (k).

Una vez filtradas, las ecuaciones que gobiernan un flujo turbulento de un fluido incompresible y newtoniano son las siguientes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l}\delta_{ij} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} \equiv \rho\overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

ISSN en trámite

Para modelar los esfuerzos a escala secundaria que resultaron de la parte filtrada del dominio numérico, se utilizó el modelo de viscosidad de remolino local que se adapta a la pared (WALE).

El dominio computacional en este estudio tiene forma de paralelepípedo rectangular. La pared horizontal inferior representa el terreno del suelo. Dos de las caras verticales del dominio son la entrada y salida, respectivamente, para la corriente de aire. Las demás superficies del dominio se consideraron como superficies con fricción. En la entrada del aire se establecen perfiles de la magnitud de la velocidad perpendicular (u) y la tasa de disipación de la turbulencia (ε); y también, un valor constante para la energía cinética turbulenta (k) como condición de frontera. A partir de simulaciones RANS (por sus siglas en inglés para Navier-Stokes promediadas por Reynolds), los parámetros de la corriente de viento se calculan y posteriormente se aplican a la entrada (Marais *et al.*, 2015). El método de vórtices (VM) se utilizó como condición de frontera de la velocidad a la de entrada para transformar la energía cinética turbulenta establecida en fluctuaciones de velocidad (Vasaturo *et al.*, 2018). El número de vórtices se estableció en una quinta parte del total de caras contenidas en la malla de la superficie de entrada de velocidad, ya que LES requiere al menos cuatro celdas de cuadrícula para resolver una escala (Gerasimov, *et al.*, 2016).

En este trabajo, los perfiles de velocidad del aire e intensidad de la turbulencia se emparejaron con los utilizados por Jafari *et al.* (2019). Lo anterior debido a que la intensidad de la turbulencia del aire tiene una influencia importante en las magnitudes resultantes de ALC (Emes *et al.*, 2017). Estos perfiles se midieron en una línea vertical ubicada en el eje de simetría del dominio (y=0) a una distancia de 0,5 m aguas arriba de la ubicación del helióstato. Durante los últimos 4 segundos de simulación, en cada 200 intervalos de tiempo (frecuencia de captura de 10 Hz), se registraron los componentes de magnitud de velocidad media e intensidad de turbulencia y dieron como resultado una velocidad media del viento (u) y una intensidad de turbulencia (I_u) de 8,25 m/s y 12,5%, respectivamente, en la HCL.

Las magnitudes de presión calculadas sobre las superficies de los helióstatos permiten estimar las fuerzas resultantes que actúan sobre su geometría y, por lo tanto, el ALC. Los coeficientes máximo y medio se calcularon mediante las siguientes ecuaciones propuestas por Peterka *et al.* (1989):

$$C_{MHy} = \frac{M_{Hy}}{\left(\frac{\rho u_{HCL}^2}{2}\right)\mathrm{AL}} \quad (1)$$

$$C_{Fx} = \frac{F_x}{\left(\frac{\rho u_{HCL}^2}{2}\right)\mathrm{A}} \quad (2)$$

$$C_{My} = C_{MHy}\left(\frac{L}{HCL}\right) + C_{Fx} \quad (3)$$

Donde, F_x es la fuerza resultante en la dirección x de la corriente de aire (es decir, la fuerza de arrastre). u_{HCL} es la velocidad del aire en HCL, L y A son la longitud y el área del lado del helióstato, respectivamente. M_{Hy} es la magnitud del momento de torsión generado sobre el eje de elevación del helióstato.

4. METODOLOGÍA COMPUTACIONAL

El mallado utilizado para este trabajo se basa en el algoritmo Patch independiente del software Ansys Meshing. La malla consta de tetraedros para la mayor parte del volumen del dominio y hexaedros en las zonas cercanas al espejo del helióstato. Se utilizó un algoritmo de inflación (propiedad de Ansys Meshing) para generar capas más delgadas (0,1 mm de altura) de volúmenes para tener una malla más densa en esas regiones. El tamaño mínimo del elemento se fijó en 0,5 mm en las zonas más finas de la malla. Un estudio de independencia de malla para cada caso indica mallas en un rango de 950.000 a 1.070.000 nodos para los problemas estudiados. Para la sección inferior se utilizó un subdominio con una altura de 0,15 m desde la pared del suelo. La cuadrícula en este subdominio inferior se estableció con un tamaño de elemento máximo de 0,025 m. La sección superior tenía una malla de tamaño máximo de elemento de 0,1 m. La superficie que representa el suelo se definió con elementos de malla de 0,01 m. Dado que la independencia de la malla no es un parámetro adecuado para evaluar la calidad de una malla en el modelado numérico LES, la configuración de la malla se puede revisar mediante el índice de calidad de resolución (LES_IQ). Se puede lograr un LES_IQ superior al 80% utilizando la configuración de cuadrícula mencionada, lo que indica una malla de buena calidad para LES (Pope, 2000). Significa que más del 80% de la energía cinética turbulenta se resolvió directamente.

Para este estudio, el tiempo de duración de las corridas numéricas se fijó en 10 s. Se observó que, en la mayoría de los casos, se necesitaba un período de estabilización de por lo menos 4 s para que se estabilizara el ALC; esto, bajo el criterio de que la pendiente de la línea de tendencia de los datos ALC de cada 2 segundos no sea mayor a 1×10^{-3}. Por lo tanto, el tiempo de simulación restante de 5 s se utilizó para registrar los parámetros más relevantes. Para la discretización del tiempo se utilizó como referencia el número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) para establecer el valor del paso de tiempo de manera confiable. Se utilizó el paso de tiempo de $5\text{x}10^{-4}$ s para todos los casos estudiados.

5. RESULTADOS

Los datos numéricos obtenidos en este estudio se compararon con los resultados informados por diferentes autores. La Tabla 2 muestra una comparación de los resultados de ALC de los modelos CFD actuales estudiados y varias magnitudes reportadas relevantes para el dimensionamiento de los mecanismos de movimiento de helióstatos y la cimentación,

ISSN en trámite

obtenidas de la experimentación de otros estudios en un túnel de viento. Se pueden observar diferencias significativas incluso entre configuraciones experimentales similares de diferentes autores. Este estudio muestra cómo la geometría en la sección posterior de un modelo de helióstato afecta el ALC resultante. Aun así, en muchos casos, estas magnitudes están cerca de los valores informados anteriormente para el ALC evaluado. La influencia de la geometría trasera de los helióstatos se analizó comparando el ALC de los helióstatos en reposo. El C_{Fx} medio y máximo para los tipos A, B, C y D se presentan en la Figura 2. Como se observa, los valores medios y pico más altos de C_{Fx} corresponden a los tipos de helióstatos con mayor área frontal. Tiene congruencia con el modelo de resistencia aerodinámica y afectará directamente a la fuerza que actúa sobre la base de los helióstatos. Se observó una diferencia más significativa para el pico C_{Fx} entre los tipos A y B cuando β=45°, mostrando una diferencia porcentual del 128 % (0.042 y 0.096 para el tipo A y el tipo B, respectivamente).

Tabla 2. Comparación de ALC para helióstatos en reposo.

	C_{My} Medio	C_{My} Pico	C_{MHy} Medio	C_{MHy} Pico
Wu *et al.*, 2010 (I =17%)	-0.05		-0.01	
Emes *et al.* 2019 (I_u =13%)		-0.43	-0.011	-0.125
Peterka *et al.* 1988 (I =14%)	-0.076	-0.461	-0.02	-0.15
Tipo A	-0.062	-0.266	-0.017	-0.147
Tipo B	-0.146	-0.335	-0.055	-0.158
Tipo C	-0.082	-0.258	-0.02	-0.126
Tipo D	-0.074	-0.244	-0.021	-0.121

La Figura 3 muestra los coeficientes C_{My} medio y máximo para los helióstatos de tipo A, B, C y D. Datos experimentales informados por Emes *et. al.* (2019) y Peterka *et. al.* (1988) se compara con los resultados obtenidos en el estudio CFD actual. Para la media de C_{My}, los valores numéricos tienen una buena concordancia con los experimentos en túnel de viento realizados por Peterka *et al.* (1988), mostrando diferencias aún menores que los resultados experimentales entre autores para varios ALC. El tipo D resultó ser el modelo más cercano al C_{My} medio informado en la literatura. El pico C_{My} que se muestra en la Figura 3b presenta la misma tendencia de C_{My} medio para el tipo B que tiene las mayores magnitudes en los límites del rango β. En este caso, la mayor diferencia entre tipos se presenta cuando β = 90°: -0.063 para el tipo C y 0.032 para el tipo A. Sin embargo, para β = 90° las magnitudes media y pico de C_{My} son las más bajas en el rango angular. Es más relevante observar diferencias porcentuales cuando se presentan valores absolutos máximos. Por lo tanto, una diferencia de C_{My} pico relevante entre tipos está presente en β =180°, cuando el tipo A y B dan como resultado 0.225 y 0.331, respectivamente.

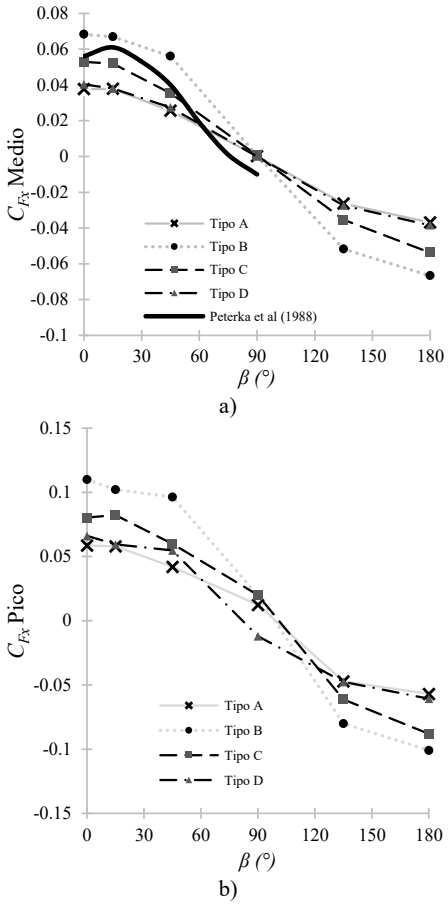
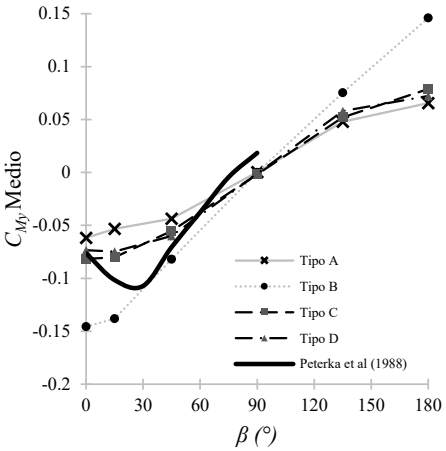


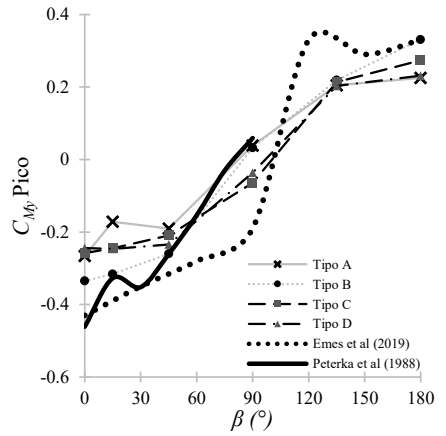
Figura 2. a) C_{Fx} medio y b) C_{Fx} pico en función del ángulo de orientación β.

Para cada orientación β, casi todos los tipos de helióstatos tienen magnitudes C_{My} medias que están dentro de un pequeño rango de diferencia; siendo 33% la diferencia máxima de los tipos A, C y D las magnitudes más bajas (i.e. -0.061 para el tipo A y -.081 para el tipo C en β =0°). En comparación con los otros tipos de helióstatos, B presentó un C_{My} medio notablemente más alto en los extremos del rango angular β, siendo el 137% la diferencia máxima con respecto al tipo A (es decir, -0,061 para el tipo A y -0,145 para el tipo B en β=0°). Esto se debe a las mayores magnitudes de C_{Fx} y C_{MHy} obtenidas en el tipo B.

ISSN en trámite



a)



b)

Figura 3. a) C_{My} medio y b) C_{My} pico en función de β.

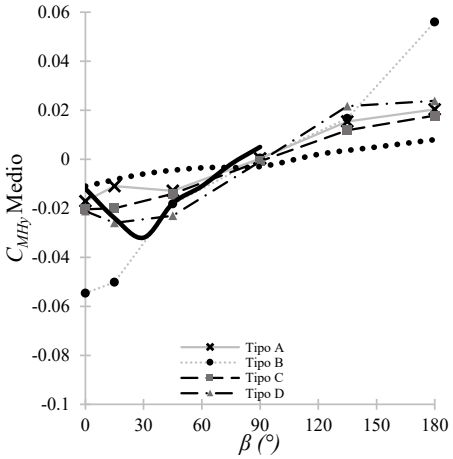
El coeficiente del momento del eje de elevación máximo es relevante para el dimensionamiento de los accionamientos de elevación o inclinación. La Figura 4 presenta la C_{MHy} media y máxima para los modelos de helióstatos tipo A, B, C y D. Los resultados de Emes *et al.* (2019) y Peterka *et al.* (1988) se muestran como medios de comparación. Los coeficientes C_{MHy} medio y picos numéricos obtenidos por LES se sobredimensionaron en casi todos los casos para Emes et al. (2019). En cambio, Peterka *et al.* (1988) informaron magnitudes medias de C_{MHy} más cercanas a las obtenidas para el tipo A. Como se observó previamente para C_{My}, el coeficiente del momento de eje de elevación también muestra una magnitud notablemente mayor en los límites del rango de β. En el caso de las magnitudes pico, la diferencia máxima entre tipos fue del 36% cuando β =180° (0,119 para el tipo A y 0,162 para el tipo B). El método utilizado por Emes *et al.* (2019) se refiere al uso de transductores de presión instalados en las superficies delantera y trasera del modelo de helióstato. Los coeficientes de presión obtenidos a partir de la presión diferencial se utilizaron para estimar el coeficiente de momento en el eje de elevación. Es probable que este método subestime el momento total que actúa sobre el eje de elevación debido a la ubicación de los sensores, ya que se pueden encontrar altos gradientes de presión cerca de los bordes de las superficies de los helióstatos. Por lo tanto, si se ubica los transductores de presión lo suficientemente lejos de los bordes, es posible que la configuración no capture completamente la información de estas zonas.

6. CONCLUSIONES

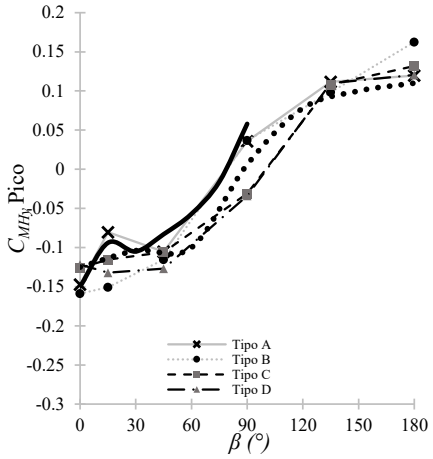
En este trabajo se estudiaron cuatro geometrías diferentes de helióstatos con el modelo numérico de turbulencia de simulación de remolinos grandes (LES). Se aplicaron variaciones geométricas entre las cajas en la estructura de soporte del espejo. Los resultados muestran que los coeficientes de carga aerodinámica son sensibles a los cambios en la forma y el tamaño de los cuerpos presentes en la cara inferior de un helióstato en reposo. A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas:

1. El helióstato Tipo A presentó las magnitudes media y máxima más bajas del ALC estudiado en este trabajo. En cambio, el tipo B muestra las magnitudes de ALC más altas para casi todos los casos de carga estudiados.
2. Los helióstatos Tipo C y D tuvieron desempeños similares en la mayoría de los escenarios analizados. Se observó que C_{Fx} en tipo C desarrolló magnitudes notablemente más altas para todas las orientaciones de viento, siendo 39% y 46% las diferencias máximas para C_{Fx} medio y pico, respectivamente. Ambos modelos de helióstatos presentaron casi los mismos resultados (es decir, la variación máxima entre ellos fue del 18 % para el pico C_{My} en β = 180°). Además, se observó una desviación de la media de C_{MHy} de los tipos C y D en ángulos β de 45° y 135°, teniendo el tipo D un C_{MHy} un 83 % mayor; sin embargo, las magnitudes de C_{MHy} no son máximas para estos valores de β. Por lo tanto, para las geometrías traseras tipo caja, la distancia desde los bordes del espejo hasta el cuerpo de la caja por sí sola no tiene un impacto significativo en los valores de ALC evaluados.
4. El helióstato tipo D tiene el espejo más delgado de todos los tipos de helióstato, sin embargo, muchos de los escenarios evaluados entre estos tipos de helióstatos presentan menos del 10% de diferencias en ALC.
5. Cuando se comparan los helióstatos A y B, el tipo B presentó una diferencia máxima de 128% de pico C_{Fx}; 47% de diferencia máxima del pico C_{My}; y 36% de diferencia máxima del pico C_{MHy}. Al analizar el tipo B frente a los tipos C y D, los resultados muestran una diferencia máxima del 60 % y el 66 % del pico C_{Fx}, respectivamente, con un 30 % y un 43 % de la diferencia máxima para el pico C_{My} respectivamente; y 25% y 35% de diferencia máxima del pico C_{MHy}, respectivamente.

ISSN en trámite



a)



b)

Figura 4. a) C_{MHy} medio y b) C*MHy* pico en función de β.

7. REFERENCIAS

Emes, M. J., Arjomandi, M., Ghanadi, F., Kelso, R. M., 2017. Effect of turbulence characteristics in the atmospheric surface layer on the peak wind loads on heliostats in stow position. Solar Energy 157, 284-297.

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., 2020a. Wind load design considerations for the elevation and azimuth drives of a heliostat. AIP Conference Proceedings 2303, 030013.

Emes, M. J., Jafari, A., Coventry, J., Arjomandi, M., 2020b. The influence of atmospheric boundary layer turbulence on the design wind loads and cost of heliostats. Solar Energy 207, 796-812.

Gerasimov, A., ANSYS Sweden, 2016. Quick guide to setting up LES-type simulations.

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. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 189, 218-230.

Kolb, G. J., Jones, S. A., Donnelly, M. W., Gorman, D., Thomas, R., Davenport, R., Lumia, R., 2007. Heliostat cost reduction study. SANDIA National Laboratories. Albuquerque, USA.

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.

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., 1988. Wind Loads on Heliostats and Parabolic Dish Collectors. Solar Energy Research Institute. Golden, USA.

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.

Pope, S. B., 2000. Turbulent flows. Cambridge University Press. Cambrigde, UK.

Vasaturo, R., Kalkman, I., Blocken, B., van Wesemael, P. J. V., 2018. Large eddy simulation of the neutral atmospheric boundary layer: performance evaluation of three inflow methods for terrains with different roughness. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 173, 241-261.

ISSN en trámite

Análisis experimental y numérico de disipadores pasivos de pared delgada

Hugo Castillo * **Dariusz Szwedowicz** * **Eladio Martínez** *
Claudia Cortés * **Quirino Estrada** **

* *Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Int. Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos.*
** *Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.*

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados de un estudio numérico experimental realizado a tres disipadores pasivos construidos con estructuras de pared delgada (EPD). El elemento en común consta de un perfil de sección cuadrada de aluminio 6063-T5, la variación corresponde a los soportes y elementos de sujeción: rodillos, perfil tipo C de acero galvanizado y topes de impacto de caucho. El modelado y la simulación computacional por elemento finito (FEM) se realizaron utilizando la paquetería comercial Abaqus. Cada disipador se caracterizó a través de sus parámetros de resistencia al choque; Energía de absorción (E_a), Energía específica de absorción (SEA), Carga pico (P_{max}), Carga promedio (P_m) y Eficiencia energética (CFE) al ser sometidos a pruebas de flexión con dos identadores diferentes. Los resultados indicaron que el uso de elastómeros incrementa la carga máxima que soporta el sistema y mejoran la eficiencia en disipación de energía.

Keywords: Perfiles, pared delgada, pruebas experimentales, resistencia al choque, elemento finito.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas dos décadas, en México se han registrado 8,481,168 accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas. De acuerdo con INEGI (2019), 5,927,382 de estos corresponden a la colisión entre vehículos automotores. En la Figura 1 se observa que el máximo de percances registrados se presentó durante el año 2007 (476,279 totales y 338,481 entre vehículos), siendo un punto que ha marcado una tendencia descendente en la cantidad de accidentes viales a nivel nacional.

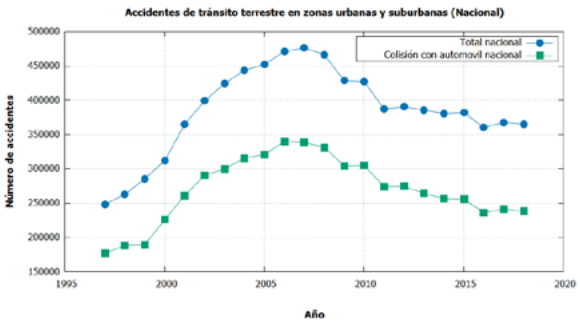


Fig. 1. Estadística nacional de accidentes de tránsito. Elaboración propia.

Ante esta situación y con la finalidad de salvaguardar la integridad de los pasajeros, el sector autotransporte trabaja continuamente en el desarrollo de sistemas de absorción de impacto. Dentro de estos sistemas se encuentran las estructuras de deformación programada, las cuales emplean sistemas pasivos de disipación de energía. De acuerdo con Duan et al. (2016), un sistema pasivo es aquel que no requiere una fuente de energía, para cumplir con su objetivo de funcionamiento y diseño. Un ejemplo de estos sistemas son las estructuras de pared delgada las cuales,de acuerdo con Chen et al. (2019), absorben la energía cinética generada por una carga de impacto y la disipan a través de grandes procesos de deformación plástica.

La absorción de energía, los mecanismos de disipación y la resistencia al choque que presentan estas estructuras, reciben especial atención y son objetos de estudio para la ingeniería actual. El siguiente artículo presenta los resultados de un análisis numérico experimental de la resistencia al choque en tres configuraciones de un disipador pasivo de absorción de energía. Se confirmó que la incorporación de elementos elastoméricos mejora el comportamiento de los sistemas de pared delgada para amortiguar el impacto. Una aplicación directa para el uso de dichos sistemas se pretende sea en vehículos del sector transporte con baja regulación en México. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de estos automotores.

ISSN en trámite



Fig. 2. Sistema de transporte Moto Taxi, fuente: El Imparcial de Oaxaca.

2. PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CHOQUE

Una estructura de pared delgada es un componente tridimensional, donde una de sus dimensiones es significativamente pequeña en relación con las otras dos, Bischoff et al. (2018). Para estudiar su comportamiento al ser sometidos a diferentes condiciones de carga a baja velocidad (8-24 km/h, Szabo and Welcher (1992)), se utilizan los criterios del *crashworthiness desing*, estos parámetros cuantifican la absorción de energía que se origina durante el impacto y se disipa a través de deformación plástica.

En su estudio Estrada et al. (2016), identifican dos parámetros esenciales para determinar la respuesta de una estructura cuando es sometida a una fuerza de aplastamiento. El primer criterio es la carga pico (P_{max}), como su nombre lo indica, representa el valor de la carga máxima soportada por la estructura antes de vencer su rigidez inicial. El segundo parámetro es la absorción de energía (E_a), donde:

$$E_a = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}\left(F\left(\delta\right)_{i+1} + F\left(\delta\right)_i\right)\cdot\left(\left(\delta\right)_{i+1} - \left(\delta\right)_i\right) \qquad (1)$$

siendo y F la fuerza registrada y δ el desplazamiento.

Después de alcanzar la carga pico, la fuerza requerida para continuar con la deformación plástica decrece. Dicha fuerza se denomina fuerza de aplastamiento promedio (P_m), expresa la relación entre la energía de absorción (E_a) y el desplazamiento donde:

$$P_m = \frac{E_a}{\delta} \qquad (2)$$

Cuando las estructuras evaluadas tienen diferente masa, se aplica el criterio de energía específica de absorción (SEA). Este parámetro relaciona la energía de absorción y la masa (m) de la estructura. La SEA cuantifica la capacidad de absorción de energía de la estructura que será disipada por medio de deformación plástica:

$$SEA = \frac{E_a}{m} \qquad (3)$$

Otro criterio que provee información útil para evaluar el desempeño de la estructura, es la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE). Éste es un parámetro adimensional donde:

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \qquad (4)$$

3. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

En la Figura 3, se muestra el concepto en general de los tres disipadores estudiados; la diferencia entre ellos es el mecanismo de sujeción. Se parte de un modelo de base conformado por un perfil de sección cuadrada ejemplificado en la Figura 3a. A este primer modelo se adicionan dos soportes de un perfil tipo C unidos por dos tornillos con su respectiva tuerca (Figura 3b), y finalmente, se agregan topes de impacto de elastómero (Figura 3c).



Fig. 3. Sistemas propuestos.

4. VALIDACIÓN DEL MODELO DISCRETO

A continuación se presenta el modelo discreto, simulación numérica y validación experimental de cada uno de los sistemas propuestos. La experimentación se realizó conforme al procedimiento señalado en la norma *ASTM* E9-89a, 1995, *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature.*

4.1 Sistema 1

Con la finalidad de generar una curva de referencia para validar el modelo numérico, se ejecutó una prueba de flexión a 3 puntos. En la Figura 4 se muestra el banco experimental. Se utilizó un perfil de aluminio de 38.1 mm de sección, 1.5 mm de espesor y una longitud de 700 mm.

La distancia entre soportes, se fijó en 300 mm, el radio de los rodillos en 15 mm y el radio del identador en 5 mm. La prueba experimental se realizó en una máquina universal de pruebas Shimadzu AG-X Plus, con una celda de carga de 100 kN. Se estableció una velocidad al identador de 6 mm/min hasta alcanzar un desplazamiento máximo de 30 mm.

En la Figura 5 se muestra la configuración del modelo discreto; el perfil se modeló como un componente deformable tipo *shell* empleando elementos S4R, al cual,

ISSN en trámite

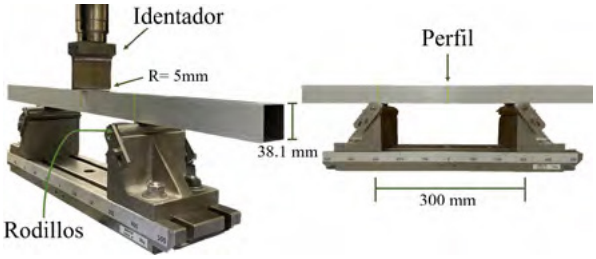


Fig. 4. Sistema 1. Modelo experimental.

se le asignaron las propiedades del Aluminio 6063-T5, caracterizado por Vergara et al. (2019), en tanto que, los soportes y el identador se consideraron elementos discretamente rígidos (R3D4).

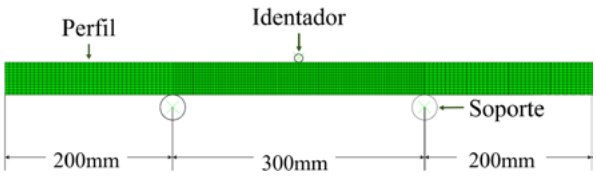


Fig. 5. Sistema 1, modelo discreto.

Se estableció un contacto superficie – superficie con coeficiente de fricción Aluminio – Acero de 0.33 entre los rodillos de soporte y el perfil de aluminio, Huang and Zhang (2019). Para capturar la intercción que tiene el sistema consigo mismo, se modelo un contacto general entre superficies con coeficiente 0.15, Vergara et al. (2019). Se consideró un tamaño general de malla de 5 mm con un refinamiento en la zona de contacto de 3 mm en el perfil.

La validación del modelo numérico se realizó mediante la comparación de la curva fuerza-desplazamiento, los parámetros de resistencia al choque y los estados finales de deformación.

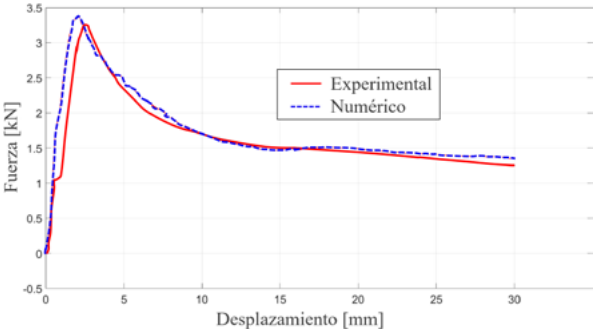


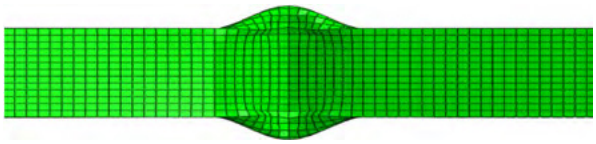
Fig. 6. Sistema 1, curva fuerza-desplazamiento.

Durante el desarrollo de la prueba de flexión a tres puntos, se identifican dos etapas características en la curva fuerza-desplazamiento (Figura 6). La primera etapa, se presenta al inicio de la prueba y es visible como una línea recta que representa la zona elástica del material. Durante este proceso se alcanza la carga máxima y a partir de este punto inicia una transición, donde el perfil opone resistencia a la carga de manera plástica. En relación a los parámetros de resistencia al choque mostrados la Tabla 1, la diferencia entre la carga pico obtenida entre el modelo numérico y la prueba experimental es del 3%, referente a la carga promedio de la diferencia es de un 2%.

Tabla 1. Parámetros de resistencia al choque, sistema 1.

Modelo	Pmax [kN]	Pm [kN]	Ea [J]	SEA [kJ/kg]	CFE -
S1-Experimental	3.26	1.70	49.71	168.72	0.51
S1-Numérico	3.39	1.74	52.17	177.04	0.51

La simulación sobrestima la Ea y SEA en un 4.8%; sin embargo, arroja un resultado preciso para el cálculo de la CFE. Adicionalmente en la Figura 7, se muestra de manera cualitativa los estados finales de deformación del perfil de aluminio. Se observa la generación de los lóbulos que caracterizan este proceso de deformación.



(a) Modelo discreto



(b) Modelo experimental

Fig. 7. Sistema 1, estados finales de deformación.

La comparación de los resultados numéricos y experimentales ha mostrado que la diferencia es menor al 5%. Resultados con una correlación similar han sido reportados por Huang and Zhang (2019) y Wang et al. (2016), de esta manera el modelo ha sido validado.

4.2 Sistema 2

Para realizar el ensayo experimental de flexión, se requirió del maquinado de una base para acoplarlo al centrador de la máquina universal. El soporte se compone de una placa de acero de 12.7 mm de espesor con un cuñero a dos diámetros en los extremos, de esta manera se aseguró el centrado con el identador y un asentamiento correcto en el área de prueba (Figura 8).

En comparación con el modelo numérico del Sistema 1, los soportes se modelaron como una sección tipo shell homogeneous, es decir, se consideraron como elementos de pared delgada con un espesor de 2.5 mm. Adicionalmente, se agregaron a dicha configuración cuatro elementos tipo sólido, cuya función es representar unión por tornillos. A estas secciones se les asignó un material con propiedades

ISSN en trámite

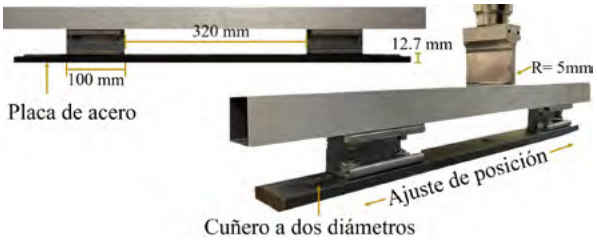


Fig. 8. Sistema 2, modelo experimental.

plásticas-elásticas: módulo de Young = 200 GPa, Relación de Poisson = 0.29 y Límite elástico = 203 MPa correspondientes al acero galvanizado. En la Figura 9 se muestra la discretización realizada.

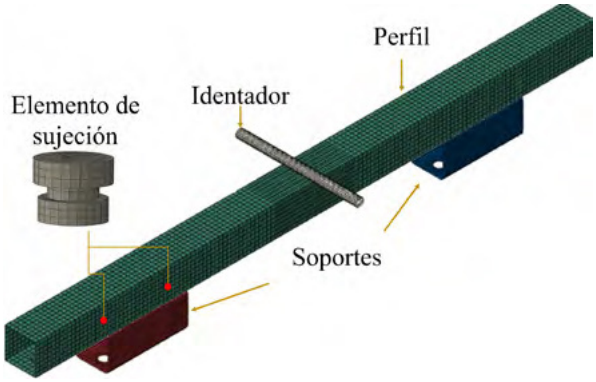


Fig. 9. Sistema 2, modelo discreto.

La validación del código numérico, se realizó a través de la curva fuerza-desplazamiento, la inspección de los estados finales de deformación y sus parámetros de resistencia al choque. En la Figura 10 se observa que el valor de la carga máxima registrado durante el ensayo de flexión es de 2.63 kN, mientras que el alcanzado de manera numérica es de 2.76 kN, esto representa una diferencia del 5%. En adición, se aprecia que la aproximación numérica subestima el comportamiento del sistema cuando éste entra en la región plástica.

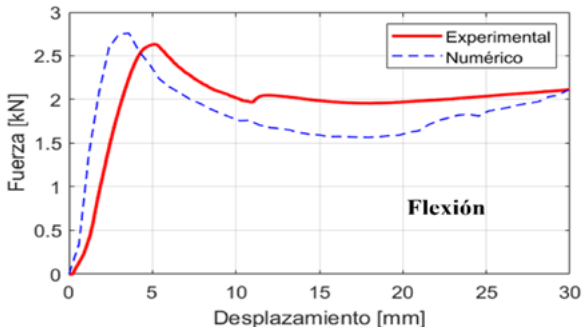


Fig. 10. Sistema 2, curva fuerza-desplazamiento.

En la Tabla 2 se muestran los valores característicos obtenidos de este análisis. El porcentaje de diferencia en la carga promedio es del 8%, en la energía de absorción y la energía específica 6% y en la CFE del 10%; con ello, se establece que el modelo numérico subestima los resultados de la prueba experimental; sin embargo, entra en un rango aceptable dentro del concepto de diseño de este tipo de uniones.

Tabla 2. Parámetros de resistencia al choque, sistema 2.

Modelo	Pmax [kN]	Pm [kN]	Ea [J]	SEA [kJ/kg]	CFE -
S2-Experimental	2.63	2.00	58.74	71.68	0.74
S2-Numérico	2.76	1.83	54.71	66.77	0.66

Los estados finales de deformación se muestran en la Figura 11, se ha obtenido una gran similitud entre los resultados del modelo numérico y la prueba experimental. En ambos casos se muestra la generación característica de lóbulos en el perfil de aluminio y el estrechamiento de los soportes.

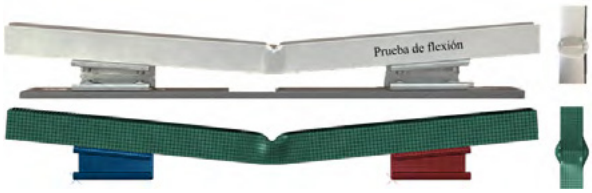


Fig. 11. Sistema 2, estado final de deformación.

4.3 Sistema 3

La configuración final del tercer modelo se muestra en la Figura 12. Las dimensiones del perfil y los soportes se conservan referente al modelo anterior. Con la finalidad de incrementar el área de contacto, se empleó un identador tipo plato con un radio de 75 mm, la configuración de velocidad y desplazamiento de la prueba se conservaron respecto a los modelos anteriores.

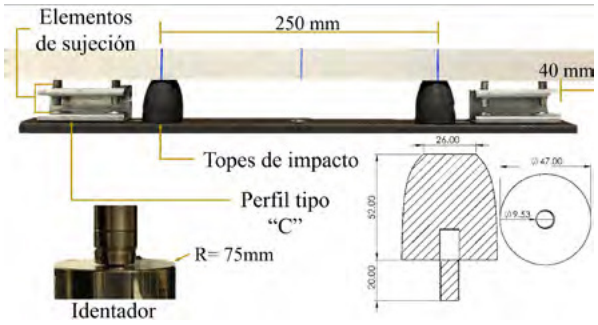


Fig. 12. Sistema 3, modelo experimental.

La discretización del prototipo se muestra en la Figura 13, se emplearon elementos tipo hexaedro de forma preferencial para el mallado, se confirió un tamaño general

ISSN en trámite

de 7 mm y 4 mm de refinamiento en las zonas de contacto. Con esta configuración el número de elementos que conformaron el modelo ascendió 11,740.

Los topes de impacto se modelaron como sólidos homogéneos de caucho (ρ = 1.2 x 10^{-9} tonn/mm^3) con propiedades hiperelásticas empleando los coeficientes del modelo Mooney-Rivling; C_1 = 0.736, C_2 = 0.184 obtenidos por Belhassen et al. (2017).

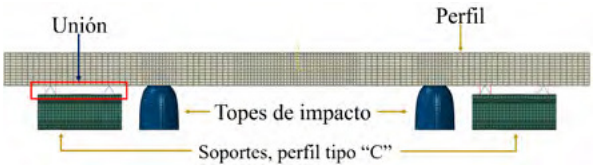


Fig. 13. Sistema 3, modelo discretizado.

En este sistema se modificó la estrategia para representar los elementos de sujeción, se excluyeron los elementos sólidos y se optó por modelar esta interacción por medio de una restricción tipo *coupling*.

Con la finalidad de validar dicho modelo, se han comparado los valores de la carga máxima registrada y la tendencia de la curva. La Figura 14 muestra la curva fuerza-desplazamiento para este sistema. La carga máxima obtenida de forma numérica es de 5.47 kN y en el experimento de 5.34 kN, la diferencia entre ambos es menor al 5%. Se observa que la presencia de ambos elementos, soporte y tope de impacto, prologan la región elástica del sistema, alcanzando la carga máxima después de 15 mm de desplazamiento, comparado con los 7 mm que le toma al sistema 2 alcanzar el pico de fuerza. Después de lograr la carga mayor, la fuerza decrece gradualmente y se incrementa de forma lineal hasta el final de la prueba. Referente a la caracterización de sistemas incorporando elastómeros, se han reportado resultados con una correlación similar en los estudios realizados por Ramezani et al. (2009), Ramezani et al. (2010) y Stańco et al. (2019).

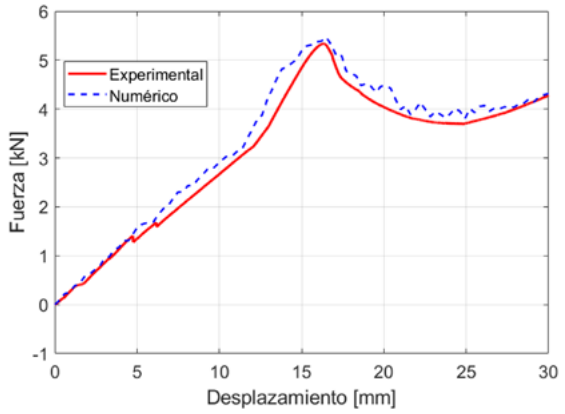


Fig. 14. Sistema 3, curva fuerza-desplazamiento.

En la Tabla 3 se muestran los parámetros de resistencia al choque de este sistema. La diferencia en la energía de absorción, la carga promedio y la SEA entre el estudio numérico y el experimento asciende a un 6%, por su parte el parámetro CFE tiene una diferencia del 4%.

Tabla 3. Parámetros de resistencia al choque, sistema 3.

Modelo	Pmax [kN]	Pm [kN]	Ea [J]	SEA [kJ/kg]	CFE -
S3-Experimental	5.34	3.12	93.56	61.85	0.58
S3-Numérico	5.47	3.33	99.66	66.08	0.61

Con estos resultados se infiere que la interacción de los cinco elementos que conforman el modelo, incrementan los parámetros de resistencia al choque de este sistema respecto al 1 y 2.

El estado final de deformación se muestra en la Figura 15. A diferencia de los sistemas anteriores, en este modelo se presentan dos zonas de generación de lóbulos; éstas coinciden con los bordes exteriores del contacto entre el indentador y el perfil. Adicionalmente, se percibe que la zona central del perfil no presenta abolladuras.

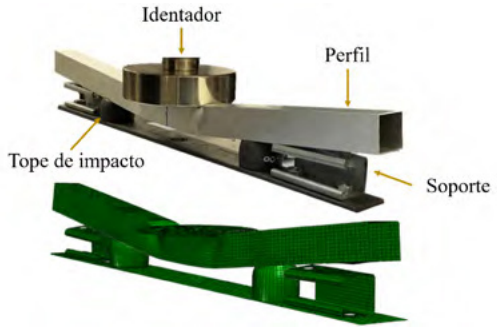


Fig. 15. Estado final de deformación, sistema 3

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha validado el modelado numérico de diferentes configuraciones de un disipador pasivo de energía con base en pruebas experimentales. Se ha caracterizado cada sistema de acuerdo en sus parámetros de resistencia al choque y se infiere que:

- Con la validación virtual lograda en este estudio, es posible realizar un análisis de variación geometrética y cuantificar el efecto que tienen la distancia entre soportes, la longitud de los soportes tipo C, el espesor y la sección transversal del perfil, el radio del identador y su colocación en relación a los parámetros de resistencia al choque.
- Debido a la presencia de los soportes y los elementos de sujeción, la rigidez cambia del sistema 1 al sistema 2. La restricción aplicada al perfil en su movimiento vertical durante el proceso de flexión, simboliza un decremento del 20% en la P_{max} (Figura 16). El valor máximo de carga pico se ha registrado en el sistema 3, este incremento con respecto a los sistemas

ISSN en trámite

anteriores, es causado por la presencia de los topes de elastómero.

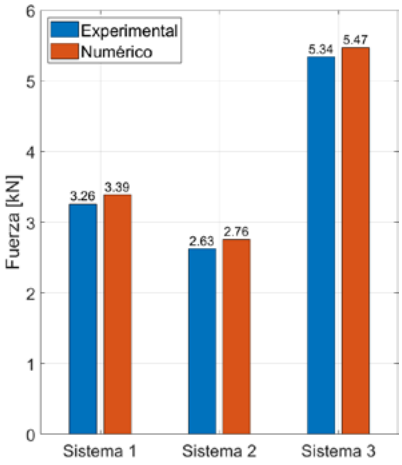


Fig. 16. Comparación de la carga pico.

- En la Figura 17 se observa que el valor más alto de la E_a corresponde al sistema 3. Esta diferencia respecto a los Sitemas 1 y 2, es originada por el incremento en el área de contacto, por el uso del identador tipo plato y por la presencia de elementos hiperelásticos.

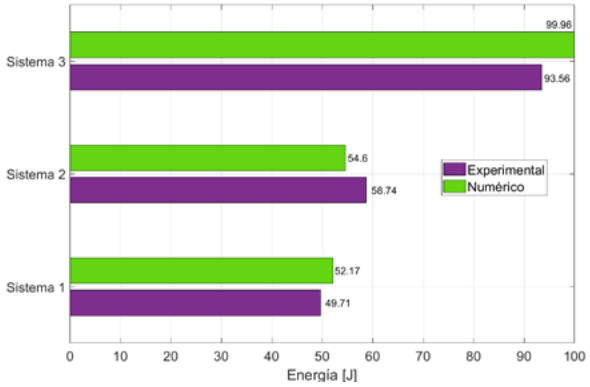


Fig. 17. Comparación de la energía de absorción.

- En el caso de la eficiencia de la fuerza de aplastamiento, el valor máximo se ha registrado en el sistema 2, ver Figura 18. Esto se debe a que la diferencia entre la carga promedio y la carga pico es de un 25%, comparado con el 40% que se registra en los demás modelos. Este resultado es un indicio de que el sistema 2 presenta una mejor disipación de energía a través de deformación plástica.
- Con base en los resultados del presente trabajo de investigació se ha demostrado que el uso de elastómeros como elementos de restitución, representa una mejora en los parámetros de resistencia al choque en sistemas pasivos de absorción de energía.

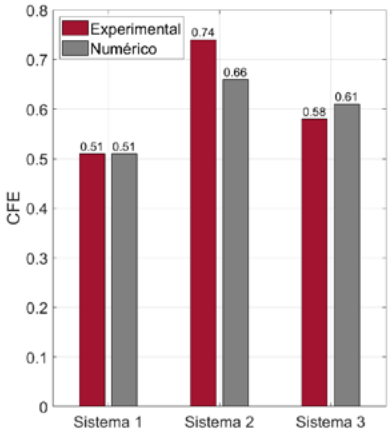


Fig. 18. Comparación de la energía de absorción.

REFERENCES

ASTM (1995). *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature E9-89a.*

Belhassen, L., Koubaa, S., Wali, M., and Dammak, F. (2017). Anisotropic effects in the compression beading of aluminum thin-walled tubes with rubber. *Thin-Walled Structures*, 119, 902–910.

Bischoff, M., Ramm, E., and Irslinger, J. (2018). Models and finite elements for thin-walled structures. *Encyclopedia of Computational Mechanics Second Edition*, 1–86.

Chen, Y., Cheng, X., and Fu, K. (2019). Multi-material design of a vehicle body considering crashworthiness safety and social effects. *International Journal of Crashworthiness*, 1–10.

Duan, L., Sun, G., Cui, J., Chen, T., Cheng, A., and Li, G. (2016). Crashworthiness design of vehicle structure with tailor rolled blank. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(2), 321–338.

Estrada, Q., Szwedowicz, D., Baltazar, M., Cortes, C., Majewski, T., and Estrada, C.A. (2016). The performance of energy absorption in structural profiles with different discontinuities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5), 1081–1094. doi:10.1007/s00170-015-7763-1. URL `https://doi.org/10.1007/s00170-015-7763-1`.

Huang, Z. and Zhang, X. (2019). Three-point bending of thin-walled rectangular section tubes with indentation mode. *Thin-Walled Structures*, 137, 231–250.

INEGI (2019). Estadística de accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas. URL `https://www.inegi.org.mx/programas/accidentes/`.

Ramezani, M., Ripin, Z.M., and Ahmad, R. (2009). Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10), 4925–4934.

Ramezani, M., Ripin, Z.M., and Ahmad, R. (2010). Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation. *CIRP Journal*

ISSN en trámite

of Manufacturing Science and Technology, 3(3), 196–203.

Stańco, M., Dzialak, P., and Zedzianowski, B. (2019). Numerical and experimental analysis of the rubber bumper stiffness. *Materials Today: Proceedings*, 12, 508–513.

Szabo, T.J. and Welcher, J. (1992). Dynamics of low speed crash tests with energy absorbing bumpers. Technical report, SAE Technical Paper.

Vergara, J., Szwedowicz, D., Estrada, Q., Jaen, U., Dominguez, M., and Landa, S. (2019). Disipación de energía por deformación plástica en structuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas de flexión. *Tecnológico Nacional de México*, 3.

Wang, Z., Li, Z., and Zhang, X. (2016). Bending resistance of thin-walled multi-cell square tubes. *Thin-Walled Structures*, 107, 287–299.

ISSN en trámite

Estudio experimental de la descarga de flujo másico granular en contenedores*

Lorenzo Jacob Pérez Ramos * **Arath Moises Espinoza Perea** **
Abraham Medina Ovando ***
Daniel Armando Serrano Huerta ****

* *Instituto Tecnológico Nacional Campus Querétaro, Av. Tecnológico s/n, Centro, 76000 Santiago de Querétaro, Qro.,(e-mail: ljpr_ @hotmail.com).*
** *Instituto Tecnológico Nacional Campus Querétaro, Av. Tecnológico s/n, Centro, 76000 Santiago de Querétaro, Qro.,(e-mail: arathmoises.24@gmail.com)*
*** *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco IPN, Av. de las Granjas 682, Santa Catarina, Azcapotzalco, 02550 Ciudad de México, CDMX.,(e-mail: amedinao@ipn.mx)*
**** *Instituto Tecnológico Nacional Campus Querétaro, Av. Tecnológico s/n, Centro, 76000 Santiago de Querétaro, Qro.,(e-mail: daniel.sh@queretaro.tecnm.mx)*

Resumen: En este trabajo se presenta un estudio experimental del comportamiento que obedece el flujo másico de material granular seco, no cohesivo, cuando es inducido por gravedad, y emerge desde el fondo y a través de las paredes verticales del contenedor. Se realizaron experimentos para mostrar la influencia del espesor de pared, w, tamaño del orificio de salida, D, ángulo de reposo θ_r y el tamaño de grano, d_g, para los diferentes materiales granulares utilizados. Se dan argumentos geométricos y físicos para obtener una correlación general, que en la literatura especializada se le puede llamar como la Ley generalizada Hagen – Beverloo. Este problema es de importancia para controlar, entre otros, las pérdidas de granos en la descarga de silos y la entrega dosificada de medicamentos.

Keywords: Flujo granular, flujo másico, diámetro, espesor de pared.

1. INTRODUCCIÓN

El flujo másico de material granular, que se descarga debido a la gravedad, desde los orificios en el fondo y las paredes laterales del contenedor, es cuantificable, mediante la masa por unidad de tiempo o flujo másico, el cual presenta algunas características interesantes que se han estudiado intensamente, en los últimos 200 años, ver por ejemplo: Hagen (1852); Beverloo et al. (1961); Choudary and Rao (2006); Medina et al. (1998). Desde el punto de vista teórico se puede utilizar como un indicador de cambios en el comportamiento del medio granular en el interior del contendor y de la proximidad de la región de atasco.

En general, la descarga de un contenedor a través de un orificio puede presentar tres regímenes: flujo continuo, flujo intermitente o una obstrucción completa del flujo debido al arqueo, McGlinchey (2009); Mankoc et al. (2007).

En los primeros estudios realizados por G. Hagen (1852), se propuso que el flujo másico promedio del material granular proveniente de un contendor es esencialmente una relación funcional de la forma $\dot{m} = c\rho g^{1/2} D^{5/2}$, donde $\dot{m}$ es el flujo másico (gr/s), ρ es la densidad de bulto, g es la aceleración de la gravedad y D es el diámetro del orificio circular de salida. Por otro lado, en el régimen de flujo continuo de material granular el flujo másico $\dot{m}$ a través de un orificio circular de diámetro, D, es descrito por la llamada Ley de Beverloo et al. (1961), $\dot{m} = c\rho g^{1/2}(d_g - kA)^{1/2}$ donde A es el tamaño de la apertura de salida, g la aceleración debida a la gravedad, ρ es la densidad de bulto y d_g es el diámetro del material granular, mientras que k y C son dos constantes adimensionales empíricas, donde k puede tener valores promedio entre $k \sim 1 - 4$. El resultado clásico de la medición del flujo másico de material granular es la llamada Ley de Hagen

* D.A. Serrano, Agradece al Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, por el apoyo al proyecto de investigación científica titulado "Estudio teórico experimental de la descarga de material granular en silos".

ISSN en trámite

(1852) - Beverloo et al. (1961), $\dot{m} = c\rho g^{1/2}(D - kd_g)^{1/2}$, formulada experimentalmente, y establece cómo cambia el flujo másico en función del tamaño del orificio de salida localizado en el fondo del contenedor. A pesar de la enorme utilidad de la Ley de Hagen (1852) - Beverloo et al. (1961), pocos estudios se han hecho para conocer su intervalo de validez, cuando los orificios de salida del material granular se encuentran situados en las paredes verticales del contenedor, Choudary and Rao (2006); Uzan (1999); Sheldon and Durian (2010); Medina et al. (2013, 2014).

El objetivo de este trabajo es estudiar experimentalmente el flujo másico cuándo los orificios de salida están localizados en las paredes laterales del contenedor, se utilizaron diferentes orificios de salida D, diferentes tamaños de grano, d_g, y también distintos espesores de pared, w. El espesor de la pared puede ser utilizado para controlar la dosificación de granos. Por otro lado, con este estudio obtenemos el valor crítico del espesor de pared, w_c para que el flujo granular se detenga y se muestra que depende directamente del ángulo de reposo del material.

2. SILOS

Los silos son contenedores de distintas formas que pueden tener una capacidad de almacenaje de unos pocos metros cúbicos o hasta centenares de ellos, y que pueden estar abiertos o cerrados herméticamente; se utilizan para el almacenamiento o conservación de una extensa gama de productos, bien sea granos, harinas, forrajes, ver Fig. 1. El almacenamiento de granos en silos es una práctica muy frecuente y su normatividad apunta a las condiciones técnicas de los silos, para garantizar su resistencia, debido a la distribución interna de la carga y a las presiones generadas en muchos casos por la fermentación del producto, Ríos (2011).



Figura 1. El Manual técnico para la construcción y el uso de los silos metálicos familiares para almacenar cereales y leguminosas de grano ha sido elaborado en la División de Infraestructuras Rurales y Agroindustrias (AGS) de la FAO como un aporte técnico significativo para la prevención de pérdidas en la etapa de poscosecha de granos y cereales.

En la actualidad los silos y tolvas industriales o de granjas, experimentan algún grado de falla cada año, como se observa en la Fig. 2, estas estructuras fallan con una frecuencia que es mucho más alta que la de cualquier otro equipo industrial. A veces la falla involucra un colapso completo y catastrófico de la estructura. Otras fallas no son tan dramáticas ni tan obvias. Por ejemplo, se pueden formar fisuras en una pared de concreto, o abolladuras en un armazón de acero, cualquiera de ellos podrán parecer sin importancia para el observador casual. Sin embargo, éstas son señales de peligro, indicando que probablemente se requiere de medidas correctivas, Ríos (2011).

El costo económico de una falla de silo nunca es pequeño, el dueño enfrenta los costos inmediatos de pérdida de la producción y de reparaciones; el personal cercano se ve expuesto a un peligro significativo y el diseñador y constructor enfrenta posibles litigios por su responsabilidad en el funcionamiento eficiente del silo.



Figura 2. Fallas estructurales en Silos

Para conservar las cosechas de granos, en las comunidades rurales se han empleado estructuras de almacenamiento como son las trojes, tapancos, ollas de barro, tambos metálicos y bolsas de polietileno, con características diversas de acuerdo a las condiciones ecológicas y climáticas de cada región. Todas ellas tienen en común que son sencillas de fabricar, que es posible utilizar materiales locales, que su costo es reducido y que, en muchos casos, pueden ser fabricados por el mismo agricultor o comprados en las tiendas locales.

Sin embargo, los mismos campesinos han modificado en gran medida los ecosistemas locales, por lo que ahora su escasa infraestructura no los protege del ataque que pueden producir las plagas a los granos y semillas, que almacenan para su sustento. En este contexto, se presenta la justificación del presente trabajo, el estudio del flujo másico como una función del espesor de pared, y la geometría del orificio, expresado en una formula empírica y sencilla, es un aporte significativo en el estudio del manejo y almacenamiento de medios granulares poscosecha.

ISSN en trámite

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Los experimentos de la descarga de material granular desde el fondo y las paredes laterales del contendor, fueron analizados utilizando un contenedor de acrílico de 10 x 10 x 50 cm como se muestra en la Fig. 3(a). Los espesores w de las paredes que se utilizaron fueron de las siguientes medidas 0.3 cm, 0.4 cm, 0.6 cm y 0.9 cm como se observa en la Fig. 3(b).

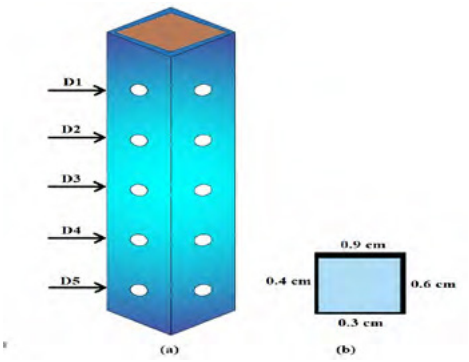


Figura 3. Contenedor con orificios de salida, y espesor de pared, w: (a) Vista frontal; (b) Vista superior donde se observan los diferentes espesores de pared.

Para lograr un mejor resultado del comportamiento del flujo másico de material granular a través de las paredes y el fondo del contenedor, se realizaron los experimentos con el contenedor lleno con diferentes materiales granulares: arena de playa, azúcar, mostaza y tapioca; como se observa en la Fig. 4, se caracterizaron las propiedades del material granular que se pueden ver en la Tabla 1. Se analizó la influencia que tiene el diámetro de salida, D, el espesor de pared, w, y el tamaño de grano d_g.

El efecto del espesor de pared es muy importante ya que conforme aumenta, el flujo másico tiende a detenerse. Se hicieron mediciones del flujo másico en función del tiempo, considerando el peso del flujo granular que sale desde el fondo y las paredes laterales del contenedor.

Tabla 1. Propiedades del material granular utilizado en los experimentos

Material granular	Ángulo de reposo Θ_r (°)	Densidad de bulto ρ (gr/cm^3)	Diámetro de grano d_g (cm)
Arena de playa	33°	1.5	0.03
Azúcar	33.5°	0.84	0.073
Mostaza	22°	0.72	0.185
Tapioca	27°	0.57	0.22

4. MEDICIÓN DEL FLUJO MÁSICO EN EL FONDO DEL CONTENEDOR

Es conocido que el grosor de pared, w, no afecta considerablemente el flujo másico $\dot{m}_0$, cuando el orificio



Figura 4. Micrografía y ángulo de reposo del material granular.

está localizado en el fondo del contenedor. En la Fig. 5 se muestra un chorro de arena (diámetro $d_g = 0.03$ cm y la densidad de bulto $\rho = 1.5gr/cm^3$) que sale por los orificios circulares de una caja de acrílico en una pared delgada, ver Fig. 5(a) y la otra con pared gruesa, Fig. 5(b).

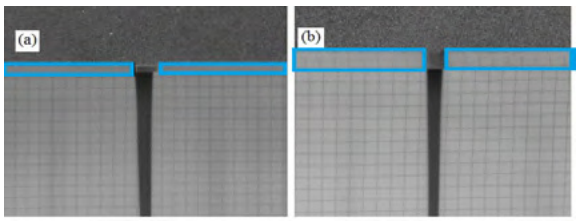


Figura 5. Chorro de arena en el fondo del contendor: (a) Pared delgada 3 mm; (b) pared gruesa 9 mm.

En la Fig. 6 se muestra una gráfica del flujo másico en función al diámetro de salida, D, muestra que para los dos espesores $w = 0.3$ cm y $w = 0.9$ cm, el espesor no era importante cuando el orificio se situaba en el fondo, además los resultados para los dos espesores de pared se ajustan bien a la fórmula de Hagen – Beverloo

5. MEDICIÓN DEL FLUJO MÁSICO EN LAS PAREDES LATERALES DEL CONTENEDOR

Para mostrar la influencia del grosor de pared sobre el flujo másico en un contenedor con paredes verticales,

ISSN en trámite

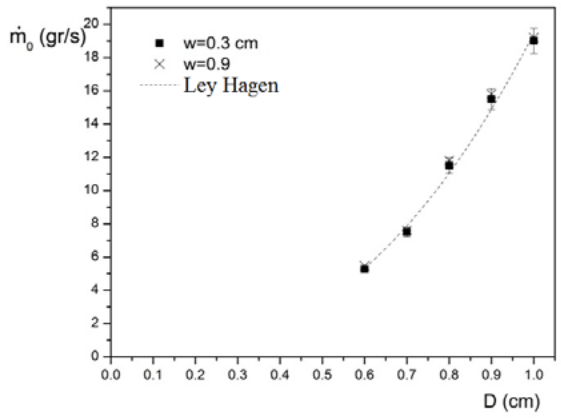


Figura 6. Gráfica del flujo másico como una función del diámetro de salida, D, en el fondo del contenedor.

se realizaron un conjunto de experimentos. En la Fig. 7 se muestran los contenedores de acrílico y donde se realizaron los orificios, situados en las paredes del contendor, con distintos diámetros, para granos chicos: $D = 0.6$ cm, $D = 0.7$ cm, $D = 0.8$ cm, $D = 1.0$ cm y para granos grandes: $D = 2.0$ cm, $D = 2.5$ cm y $D = 3.0$ cm, así como los materiales granulares empleados, Serrano et al. (2015a,b).

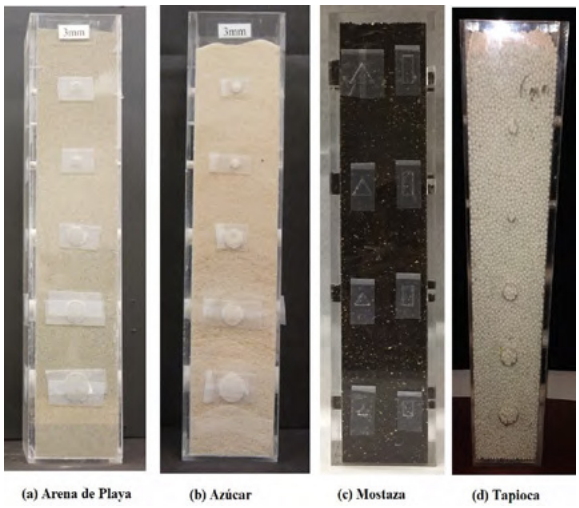


Figura 7. Prototipo experimental del contenedor lleno con material granular.

La Fig. 8 se muestra el procedimiento experimental empleado para hacer las mediciones del flujo másico. Se trata de un recolector que está montado sobre un sensor de fuerza modelo PASCO CI-6537 con una resolución de 0.03 N, éste se coloca cerca de la pared y al destaparse el orifico, se adquirieron los datos para un tiempo determinado de 10 s, para cada orificio en cada pared como se reporta en, Serrano et al. (2015a,b)

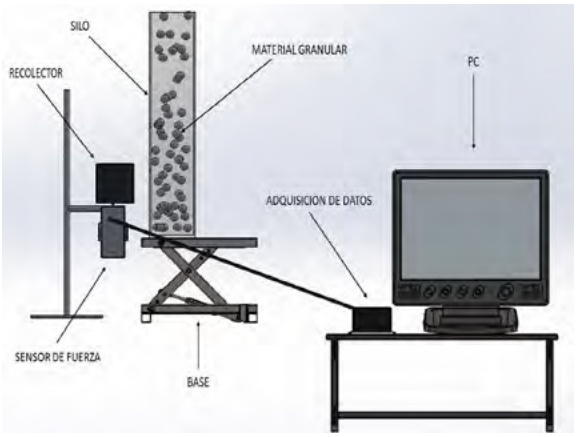


Figura 8. Representación de la configuración experimental de un contenedor. El flujo másico se mide con un sensor de fuerza.

Las medidas del flujo másico de material granular obtenidos con el sensor de fuerza nos permiten gráficar los datos de la Fig. 9, donde se observa el flujo másico en función del espesor de pared, para un valor fijo del diámetro D; existe una fuerte dependencia en el espesor de pared w, en esta misma gráfica se puede observar el paro del flujo para cada espesor.

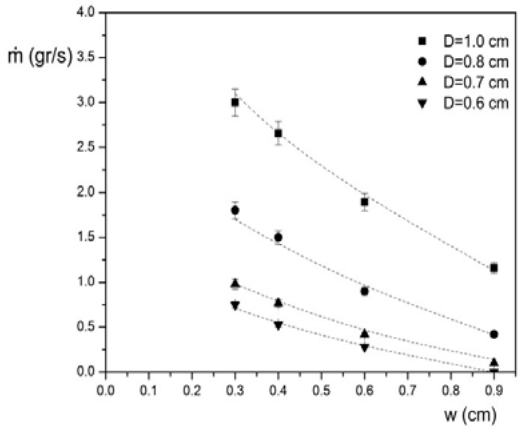


Figura 9. Gráfica del flujo másico como una función del espesor de pared, w. Cada Ajuste a los datos experimentales corresponde a los diferentes diámetros utilizados para granos chicos (arena de playa y azúcar), se realizó mediante el uso de la Ec. 2. Barras de error de 4 %

6. MEDICIÓN DEL FLUJO MÁSICO CONSIDERANDO EL TAMAÑO DE GRANO

En trabajos reportados sobre los flujos de sólidos granules a través de orificios circulares en la parte inferior de los

ISSN en trámite

silos, Hagen y muchos años después Beverloo, reportaron que la corrección más adecuada para predecir el flujo másico en las salidas en el fondo de los contenedores, tolvas y silos es la llamada correlación de Hagen - Berverloo, que es de la siguiente forma

$$\dot{m}_o = \rho g^{1/2}(D - kd)^{5/2} \tag{1}$$

Esto significa que el flujo másico para granos grandes se reduce debido al efecto de volumen excluido. A la inversa, cuando $D \gg d_g$ el término $(D - kd_g) \to D$ y por lo tanto el flujo másico aumenta, analizamos si este efecto se produce para el flujo másico a través de los orificios en las paredes laterales de los contenedores, con distinto espesores de pared, w. Con el fin de evaluar la influencia del espesor de pared, cada pared vertical del contenedor tiene un espesor de pared específico, w. Como se muestra en la Fig. 10. El término $arctan(D/w)$ puede fácilmente ser identificado como el ángulo de la pared, α, es decir $\alpha = arctan(D/w)$. En la Fig. 10, vemos que sí $\alpha > \theta_r$, ocurre el flujo por gravedad y cuando $\theta_r > \alpha$ el flujo se detendrá. Realizamos experimentos con materiales granulares no cohesivos, con granos de diámetro grande. Específicamente, se utilizaron granos de mostaza y perlas de tapioca. De acuerdo con el procedimiento experimental establecido con anterioridad Medina et al. (2013), medimos el flujo másico a la salida de los orificios en el fondo del contenedor, $\dot{m}_0$.

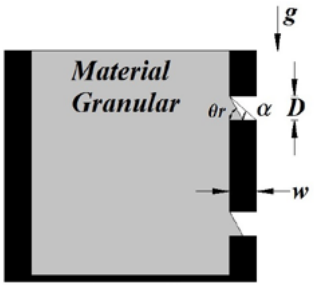


Figura 10. Vista esquemática del contendor y los orificios situados en la pared lateral, donde emerge el material granular.

7. RESULTADOS

Recientemente Serrano et al. (2015a) derivaron una fórmula, para el flujo másico, a través de los orificios en las paredes laterales, que acepta la dependencia del diámetro del orificio D y del espesor de pared w, para materiales granulares sólidos donde el límite es $D \gg d_g$; donde d_g es el diámetro medio de grano. Encontramos que el flujo masico obedece la relación, Serrano et al. (2015a)

$$\dot{m}_o = \rho g^{1/2} D^{5/2} \left[arctan\left(\frac{D}{w}\right) - \theta_r \right] \tag{2}$$

Este resultado implica que el espesor de pared del contenedor tiene una importante influencia en el flujo por gravedad. Sin embargo, para granos gruesos o granos grandes como se menciona en la literatura especializada a este problema, la Ec. 2, no demuestra la influencia que tiene el tamaño de grano y no se consideran los coeficientes de descarga, c, para los distintos materiales granulares utilizados. Por tal motivo la mejor relación que se ajusta a los datos experimentales tiene la forma:

$$\dot{m}_o = \rho g^{1/2}(D - kd)^{5/2} \left[arctan\left(\frac{D}{w}\right) - \theta_r \right] \tag{3}$$

Donde el coeficiente de descarga, c, es adimensional y tiene un valor para la mostaza de $c = 0.13$ y para las perlas de tapioca $c = 0.15$. Gráficamos el flujo másico experimental a través de los orificios en las paredes laterales del contendor y lo comparamos con la Ec. 3 como se observa en la Fig. 11., dado a los resultados se puede establecer que la Ec. 3 es la ley de Hagen – Beverloo generalizada para el flujo másico de material granular en las paredes verticales del contenedor.

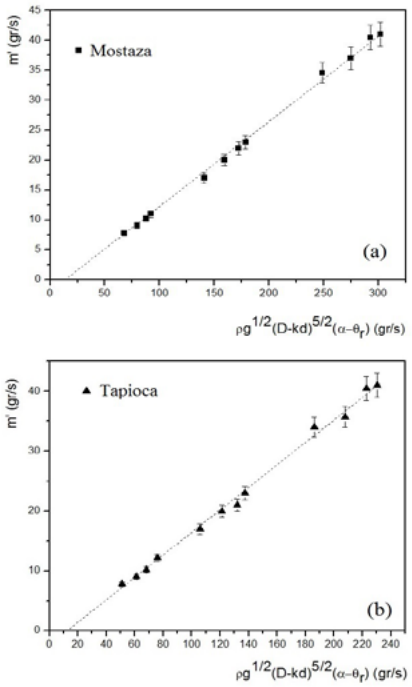


Figura 11. Relación del flujo másico experimental en función a la Ley Generalizada de Hagen – Berverloo, para granos gruesos o grano grandes y diámetros de salida: $D = 2.0$ cm, $D = 2.5$ cm y $D = 3.0$ cm. Barras de error de 4%

Por otra parte, los resultados anteriores nos dan la confianza para explorar otras consecuencias importantes de la Ec. 3. La primera es que la Ec. 3, nos permite determinar el espesor crítico de la pared del contenedor, w_c, para el cual el flujo de salida en los orificios laterales se detendrá, es decir no hay flujo en absoluto cuando $\dot{m}_0 = 0$ o si $\alpha = \theta_r$. Por lo tanto, el valor crítico de w para el paro, es una función de D y θ_r, de la forma:

ISSN en trámite

$$w_c = \frac{D}{\tan\theta_r} \tag{4}$$

Mediante el empleo de diversos valores de D utilizados en los experimentos con la mostaza y las perlas de tapioca y usando sus respectivos ángulos de reposo, hemos comprobado que esta relación predice con mucha precisión los espesores de las paredes para que el flujo másico de salida sea detenido.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo estudiamos experimentalmente el problema del flujo másico de material granular a través de orificios circulares transversales en las paredes verticales y en el fondo de los contenedores. Analizamos la dependencia del flujo másico de material granular en función del diámetro de salida del orificio, D, y el espesor de la pared, w, utilizamos diversos materiales granulares; observamos y reportamos que los valores de flujo másico en un mismo diámetro a distintas alturas no varían drásticamente.

Las mediciones del ángulo de reposo, θ_r y del grosor de pared crítico, w_c, son indispensables para entregar de manera eficiente la dosificación del material granular, estos parámetros son considerados en la Ec. 3, la ley generalizada de Hagen - Beverloo, este modelo permite evitar los atascamientos del material a la salida lateral del contenedor.

Por tal motivo, consideramos el espesor de las paredes del contenedor a salida del flujo másico granular, entre más grande es el espesor, se forma un ángulo natural del contenedor, α, como se muestra en la Fig. 10, lo que forma un montículo de material a la salida del orificio, el cual se puede utilizar para el paro natural del chorro de material granular, sin utilizar algún tipo de accesorio como compuertas o tapones.

El modelo que se propuso se ajusta bien a los resultados experimentales; más estudios para diferentes formas de orificios se necesitan para obtener un modelo general válido para una amplia gama de configuraciones. Como resultado de este trabajo, se presenta un nuevo método en la literatura para medir y calcular el flujo másico de material granular, por otro lado es la primera vez que en la literatura especializada se reportan experimentos para el problema del flujo másico de material granular no cohesivo en contenedores de paredes verticales con orificios circulares.

Específicamente, hemos estudiado la dependencia de $\dot{m}_0$, en función de D y w, mediante el uso de diferentes materiales granulares (arena de playa, azúcar, mostaza y tapioca). Cabe mencionar lo aquí reportado constituyen los primeros estudios experimentales donde se analiza la influencia del espesor de pared w, en la salida el flujo másico. Actualmente Li et al. (2017) está empleando esta investigación para el enfriamiento de reactores nucleares de última generación y Chhabra and Gurappa (2019) destacan la utilidad de las fórmulas discutidas para el diseño y construcción de los silos que almacenan granos perecederos.

REFERENCIAS

Beverloo, W., Leniger, H., and de Velde, J.V. (1961). The flow of granular solids through orifices. *Chemical engineering science*, 15, 260–269.

Chhabra, R.P. and Gurappa, B. (2019). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering: Volume 2A: Particulate Systems and Particle Technology*. Butterworth-Heinemann.

Choudary, S. and Rao, K.K. (2006). Experiments on the discharge of granular materials through vertical and horizontal orifices of a vertical tube. *Indian Academy of Science, Project Report.*

Hagen, H. (1852). Bericht über die zur bekanntmachung geeigneten verhandlungen der königlich preussischen akademie der wissenschaften zu berlin. *Berlin: Verl. d. Kgl. Akad. d. Wiss*, 35, 35–42.

Li, T., Zhang, H., Liu, M., Huang, Z., Bo, H., and Dong, Y. (2017). Dem study of granular discharge rate through a vertical pipe with a bend outlet in small absorber sphere system. *Nuclear Engineering and Design*, 314, 1–10.

Mankoc, C., Janda, A., Arévalo, R., Pastor, J., Zuriguel, I., Garcimartín, A., and Maza, D. (2007). The flow rate of granular materials through an orifice. *Granular Matter*, 9, 407–414.

McGlinchey, D. (2009). *Bulk solids handling: equipment selection and operation*. John Wiley and Sons.

Medina, A., Cabrera, D., López-Villa, A., and Pliego, M. (2014). Discharge rates of dry granular material from bins with lateral exit holes. *Powder Technology*, 253, 270–275.

Medina, A., Cordova, J., Luna, E., and Trevino, C. (1998). Velocity field measurements in granular gravity flow in a near 2d silo. *Physics Letters A,*, 250, 111–116.

Medina, A., Serrano, D., and Gutierrez, G.J. (2013). On the mass flow rate from silos with lateral exit holes. *Revista Mexicana de Física*, 59, 287–291.

Ríos, A. (2011). Instituto de investigaciones de ingeniería agrícola. *Máquinas agrícolas, tracción animal e implementos manuales*, 23.

Serrano, D., Medina, A., Chavarría, G.R., Pliego, M., and Klapp, J. (2015a). Mass flow rate of granular material flowing from tilted bins. *Powder Technology*, 286, 438–443.

Serrano, D., Sanchéz-Silva, F., Klapp, J., and Medina, A. (2015b). The hagen-beverloo law for outflow of granular solids from holes on side walls. *Revista Mexicana de Física*, 61, 207–210.

Sheldon, H. and Durian, D. (2010). Granular discharge and clogging for tilted hoppers. *Granular Matter*, 12, 579–585.

Uzan, J. (1999). Granular material characterization for mechanistic pavement design. *Chemical engineering science*, 125, 108–113.

ISSN en trámite

Construcción de una solución de referencia para la conducción de calor en un cilindro de dos losas considerando la resistencia térmica de contacto.

T. Leyva-Contreras*, I. Hernández-López*, I. Hernández-Pérez**

**Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000 (e-mail: irving.hernandez@unison.mx).*

***Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, DAIA-UJAT, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km 1, Cunduacán, Tabasco, CP 86690.*

Resumen: Este trabajo proporciona el desarrollo de una solución analítica de la conducción de calor bidimensional en un cilindro de dos losas con resistencia térmica de contacto (R_{th}) entre ellas. La solución analítica fue evaluada mediante la verificación con una solución numérica encontrando diferencias menores al 0.02%. En una segunda etapa, se realizó un estudio paramétrico del efecto de R_{th} sobre el flujo de calor en la interfase (q_f) donde se encontró que q_f es inversamente proporcional a R_{th} lo cual ratifica el comportamiento físico de que R_{th} se oponga al establecimiento de q_f. Adicionalmente, se observó que q_f presentó valores máximos para razones de conductividad (K) cercanos a 1.0, siendo el mayor de 54 kW/m^2 para R_{th}=1E-06 m^{2}K/W. Finalmente, se concluye que la solución desarrollada proporciona una solución de referencia que puede ser útil para la verificación de algoritmos numéricos cuyo propósito sea el estudio térmico de sistemas cilíndricos multicapa que contemplen la resistencia térmica de contacto.

Palabras clave: Conductividad térmica, Solución de referencia, Resistencia térmica de contacto.

1. INTRODUCTIÓN

En la actualidad, los materiales compuestos multicapa tienen distintas aplicaciones que resultan de gran importancia en la ingeniería. Estos son utilizados por la industria aeroespacial, naval, civil, química, en la industria automotriz para sistemas de freno y fricción, por la industria eléctrica en los núcleos de los transformadores, en materiales para la conformación termoplástica de polímeros, en el área de energía, ya sea en intercambiadores de calor, aletas o en la estimación de propiedades térmicas, e incluso, los utiliza la ingeniería biomédica en la producción de materiales para implantes (Lu *et al*. 2006).

En particular, en el área de metrología, resulta de gran interés el estudio de los materiales cilíndricos multicapa, ya que existen instrumentos con esta geometría para la medición de la conductividad térmica en sólidos. Entre ellos están el Aparato de Placa Caliente con Guarda APCG (Xamán *et al*. 2009) y el instrumento de barras cortadas (Esquivel 2010, Xamán *et al*. 2017). Este instrumento consiste en un arreglo de elementos cilíndricos dispuestos uno sobre otro de manera axial y rodeados de un material aislante para minimizar el flujo de calor en dirección radial (ASTM E-1225 2004).

Para la construcción de estos dispositivos es necesario realizar un diseño térmico mediante un análisis riguroso de los parámetros involucrados: materiales de referencia a utilizar, sus dimensiones, espesor del aislante, entre otros (Esquivel 2010). Debido a la complejidad del sistema, el diseño térmico se realiza mediante la solución numérica de la ecuación de difusión de calor en coordenadas cilíndricas. Sin embargo, es sabido que todo proceso de modelado matemático demanda la verificación de la metodología de solución utilizando los resultados de problemas de referencias. Esto permite garantizar que los resultados obtenidos sean correctos.

De esta manera, es comprensible que exista la necesidad de contar con soluciones de problemas de referencia para sistemas cilíndricos multicapas, ya que éstas proporcionan un conocimiento detallado y preciso de las distribuciones de temperatura y los flujos de calor de cilindros. En la medida de lo posible, se busca que la solución de referencia sea una solución analítica. Sin embargo, la posible dependencia de la temperatura y/o del espacio sobre las propiedades termofísicas, así como la presencia de condiciones de fronteras no lineales, hacen que la obtención de soluciones analíticas sea compleja. Actualmente, se dispone de distintos métodos para determinar el campo de temperaturas, entre ellos están la transformada de Laplace y funciones de Green, para los cuales se necesitan llevar a cabo iteraciones numéricas en la búsqueda de valores propios y residuos, por lo que su cálculo no es totalmente automático y además consumen tiempo de cómputo. Esta es la razón por la cual se busca plantear y explorar nuevos métodos para resolver problemas de una forma más fácil y eficiente. De esta manera, siempre que sea posible, las soluciones analíticas son preferibles sobre las numéricas. En primer lugar, porque proporcionan la solución exacta del modelo matemático y con ello, una mejor percepción del fenómeno. En segundo lugar, estas soluciones pueden fungir como soluciones de referencia

ISSN en trámite

para la verificación de algoritmos numéricos que pretendan resolver configuraciones más complejas cuya solución analítica sea imposible de construir. Un punto importante por considerar en los sistemas multicapa, es la resistencia térmica de contacto (R_{th}). En la mayoría de las soluciones exactas que se construyen para estos sistemas, este parámetro es despreciado, es decir, se considera que las capas tienen contacto perfecto y con ello, resistencia térmica nula. Esto es comprensible ya que la presencia de la R_{th} dificulta aún más la construcción de soluciones analíticas. En este sentido, a pesar de que ya se han propuesto métodos de solución para los problemas de conducción de calor en sólidos laminados, existe una continua necesidad de desarrollar y explorar métodos novedosos para resolver problemas cuyas soluciones exactas aun no existen.

De acuerdo con la bibliografía revisada, Yeh (2007) aplicó el método de separación de variables para resolver el proceso de un calentamiento de plasma en una losa unidimensional con dos capas. (Jain *et al.*, 2009) presentaron una solución analítica en series para la conducción en un medio anular multicapa. Singh *et al.* (2008) resolvieron la conducción asimétrica dependiente de tiempo en un caso similar al trabajo de Jain *et al.* (2009) pero con condiciones de frontera dependiente de tiempo y utilizando el método de la transformada integral. Más tarde, Delouei *et al.* (2012) obtuvieron la solución de la conducción de calor transitoria axisimétrica en un cilindro multicapa ortotrópico. En un trabajo posterior, Wang y Liu (2013) presentaron la solución exacta para la conducción de calor transitoria en un cilindro compuesto de fibras multicapa reforzadas. Finalmente, con el propósito de verificar la solución numérica del campo de temperaturas en un cilindro compuesto de tres capas, Xamán *et al.* (2017) construyeron la solución analítica mediante la expansión ortogonal de series de Fourier-Bessel utilizando el método de separación de variables. Estos autores demostraron que su algoritmo numérico produce resultados satisfactorios con un error relativo máximo de 0.21 % con respecto a la solución analítica.

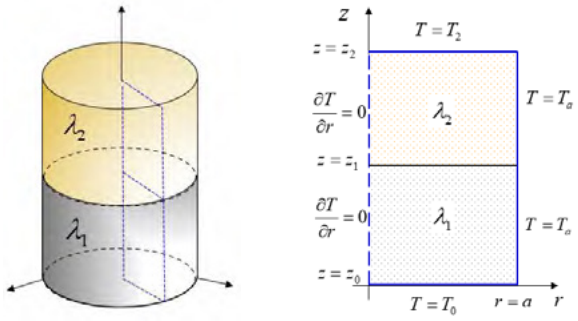
La revisión señala que, si bien existen varios estudios sobre la conducción de calor en cilindros multicapa, el efecto de la resistencia térmica de contacto en todos ellos es despreciada. De este modo, el presente trabajo tiene como propósito desarrollar una solución exacta del problema de conducción de calor en coordenadas cilíndricas ($r; z$) en un medio laminado en dirección axial, considerando que la resistencia térmica de contacto no es nula. Esta solución puede utilizarse como un problema de referencia para la verificación de soluciones numéricas que pretendan resolver problemas en este tipo de configuraciones.

2. MODELO FÍSICO Y MODELO MATEMÁTICO

2.1 Modelo físico

La configuración por resolver se presenta en la Figura 1, y consiste en un cilindro compuesto de dos materiales en dirección axial, en el cual es objeto de estudio la conducción de calor en dos dimensiones.

En relación con las condiciones térmicas del sistema, se considera que sus fronteras tienen una temperatura prescrita, también llamadas condiciones de frontera de Dirichlet. La cara lateral presenta una temperatura T_a, mientras que las superficies inferior y superior poseen una temperatura T_0 y T_2 respectivamente. Además, se considera la resistencia de contacto térmico en la unión, lo cual es de gran importancia porque se presentan caídas de temperatura a través de las interfases debido al contacto imperfecto entre las superficies de los materiales.



(a) (b)

Figura 1. Modelo del cilindro de dos capas. (a) Vista tridimensional. (b) Modelo físico con condiciones de frontera.

Adicionalmente, se considera que la conductividad térmica del sistema es independiente de la temperatura. Sin embargo, en un caso general, las losas del sistema suelen ser de materiales distintos, por lo tanto, dicha propiedad presenta dependencia sobre la coordenada axial. Las consideraciones para el modelo matemático son las siguientes: 1) Flujo de calor bidimensional en el plano r-z, 2) conducción de calor en estado permanente, 3) no existe generación ni consumo de energía, 4) cada capa está constituida por un material isotrópico, 5) condiciones de frontera de Dirichlet y 6) debido a la existencia de R_{th} en la unión, se plantea una condición de continuidad en $z=z_1$.

2.2 Modelo matemático

La ecuación gobernante de la transferencia de calor por conducción en el cilindro de dos capas está dada por la ecuación de difusión bidimensional de calor en coordenadas cilíndricas (Ec. 1) con una condición de simetría en $r=0$ y condiciones de frontera de Dirichlet en $r=a$, $z=z_2$ y $z=z_0=0$. La variación espacial de la conductividad térmica puede representarse con la Ec. (2).

ISSN en trámite

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(z)\cdot r\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(z)\cdot\frac{\partial T}{\partial z}\right)=0 \quad (1)$$

donde:

$$\lambda(z)=\begin{cases}\lambda_1 & , \quad z_0<z<z_1\\ \lambda_2 & , \quad z_1<z<z_2\end{cases} \quad (2)$$

condiciones de frontera:

$$\frac{\partial T}{\partial r}=0 \quad , \quad r=0 \quad (3)$$

$$T=T_a \quad , \quad r=a \quad (4)$$

$$T=T_0 \quad , \quad z=z_0 \quad (5)$$

$$T=T_2 \quad , \quad z=z_2 \quad (6)$$

condición de continuidad:

$$-\lambda_1\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z_1^-}=\frac{T(r,z_1^-)-T(r,z_1^+)}{R_{th}}=-\lambda_2\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z_1^+} \quad , \quad z=z_1 \quad (7)$$

3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

3.1 Solución del modelo matemático

Para resolver el modelo matemático (Ec. 1) se eligió el método de separación de variables. Este método tiene la característica de que puede aplicarse solamente para problemas homogéneos y lineales. Sin embargo, debido a las condiciones de frontera (no homogéneas) y a la dependencia espacial de la conductividad térmica (no linealidad), la Ec. (1) no cumple con ninguno de estos requisitos. Para soslayar el primer inconveniente, puede recurrirse al principio de superposición. La no linealidad puede sobrellevarse si se resuelve de manera segregada cada una de las capas del cilindro compuesto. De acuerdo con lo anterior, la solución para el campo de temperaturas en la primera capa ($z_0 < z < z_1$) es:

$$T(r,z)=\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\frac{J_0(\beta_m r)}{N(\beta_m)\sinh(\beta_m Z_1)}\left[\sinh\beta_m(z_1-z)\int_0^a r\Delta T_0 J_0(\beta_m r)dr+\sinh\beta_m(z-z_0)\int_0^a r f_1^d(r)J_0(\beta_m r)dr\right]\right\}+T_a \quad (8)$$

mientras que para el segundo material ($z_1 < z < z_2$):

$$T(r,z)=\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\frac{J_0(\beta_m r)}{N(\beta_m)\sinh(\beta_m Z_2)}\left[\sinh\beta_m(z_2-z)\int_0^a r f_1^u(r)J_0(\beta_m r)dr+\sinh\beta_m(z-z_1)\int_0^a r\Delta T_2 J_0(\beta_m r)dr\right]\right\}+T_a \quad (9)$$

donde $\Delta T_0=T_0-T_a$, $\Delta T_2=T_2-T_a$, mientras que $f_1^d(r)$ y $f_1^u(r)$ son incógnitas por determinar. Estas incógnitas representan las temperaturas en la interfaz de ambos medios. En el caso de contacto perfecto (R_{th}=0) se tiene que $f_1^d(r)=f_1^u(r)$. Sin embargo, cuando no existe contacto perfecto, estas incógnitas no son iguales. Por otro lado, β_m son los valores propios, $J_0(\beta_m r)$ es la función de Bessel de primera clase de orden cero y $N(\beta_m)$ es la norma. De acuerdo con Ozisik (1993), las expresiones para calcular la norma y los valores propios son:

$$N(\beta_m)=\frac{a^2}{2}J_1^2(\beta_m a) \quad (10)$$

$$J_0(\beta_m a)=0 \quad (11)$$

Las integrales en las Ecs. (8) y (9) que involucran a ΔT_0 y ΔT_2 pueden resolverse sin problema:

$$\int_0^a r\cdot\Delta T_0\cdot J_0(\beta_m r)\cdot dr=\frac{a\cdot J_1(\beta_m a)}{\beta_m}\Delta T_0 \quad (12)$$

$$\int_0^a r\cdot\Delta T_2\cdot J_0(\beta_m r)\cdot dr=\frac{a\cdot J_1(\beta_m a)}{\beta_m}\Delta T_2 \quad (13)$$

No obstante, ya que las temperaturas $f_1^d(r)$ y $f_1^u(r)$ son desconocidas, sus integrales no pueden realizarse. De este modo, para hacer factible la evaluación de dichas integrales, se propone la siguiente hipótesis:

$$\int_0^a r\cdot f_1^d(r)\cdot J_0(\beta_m r)\cdot dr=\frac{a\cdot J_1(\beta_m a)}{\beta_m}\Delta T_1^d \quad (14)$$

$$\int_0^a r\cdot f_1^u(r)\cdot J_0(\beta_m r)\cdot dr=\frac{a\cdot J_1(\beta_m a)}{\beta_m}\Delta T_1^u \quad (15)$$

donde ΔT_1^d y ΔT_1^u son constantes por determinar.

El argumento de esta proposición se basa en que, aun cuando un factor del integrando es desconocido, al tratarse de integrales definidas, se sabe que el resultado será un número real. Con base en esto, y por conveniencia matemática, se propone que el resultado sea semejante al correspondiente de las integrales en las Ecs. (12) y (13). Sin embargo, a pesar de que aún deben de determinarse dos incógnitas, éstas ya no son funciones en un integrando, sino simples constantes. Las Ecs. (8) y (9) en términos de las nuevas incógnitas son:

para $z_0 < z < z_1$

$$T(r,z)=\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\frac{J_0(\beta_m r)}{N(\beta_m)\sinh(\beta_m Z_1)}\times\frac{a\cdot J_1(\beta_m a)}{\beta_m}\left[\sinh\beta_m(z_1-z)\Delta T_0+\sinh\beta_m(z-z_0)\Delta T_1^d\right]\right\}+T_a \quad (16)$$

y para $z_1 < z < z_2$:

ISSN en trámite

$$T(r,z)=\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\frac{J_0(\beta_m r)}{N(\beta_m)\sinh(\beta_m Z_2)}\times \right.$$
$$\left.\times\frac{a\cdot J_1(\beta_m a)}{\beta_m}\left[\sinh\beta_m(z_2-z)\Delta T_1^u+\sinh\beta_m(z-z_1)\Delta T_2\right]\right\}+T_a \quad (17)$$

El cálculo de las incógnitas ΔT_1^d y ΔT_1^u demanda hallar dos ecuaciones que las relacionen. Éstas se obtienen de la Ec. (7):

$$-\lambda_1\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z_1^-}=\frac{T(r,z_1^-)-T(r,z_1^+)}{R_{th}} \quad (18)$$

$$\frac{T(r,z_1^-)-T(r,z_1^+)}{R_{th}}=-\lambda_2\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z_1^+} \quad (19)$$

Sustituyendo la Ecs. (16) y (17) en las Ecs. (18) y (19) y después de un procedimiento algebraico se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas cuyas soluciones son:

$$\Delta T_1^d=\frac{A_u K_1\Delta T_0+BK_2\Delta T_2}{A_d A_u-B^2} \quad (20)$$

$$\Delta T_1^u=\frac{BK_1\Delta T_0+A_d K_2\Delta T_2}{A_d A_u-B^2} \quad (21)$$

donde:

$$A_d=\lambda_1\cdot\coth\beta_m Z_1+\frac{1}{\beta_m\cdot R_{th}} \quad (22)$$

$$A_u=\lambda_2\cdot\coth\beta_m Z_2+\frac{1}{\beta_m\cdot R_{th}} \quad (23)$$

$$B=\frac{1}{\beta_m\cdot R_{th}} \quad (24)$$

$$K_1=\frac{\lambda_1}{\sinh\beta_m Z_1} \quad (25)$$

$$K_2=\frac{\lambda_2}{\sinh\beta_m Z_2} \quad (26)$$

$$Z_1=z_1-z_0 \quad (27)$$

$$Z_2=z_2-z_1 \quad (28)$$

Así, el campo de temperatura en el cilindro de dos capas con resistencia térmica de contacto está dado por las Ecs. (16) y (17) en conjunto con las Ecs. (10), (11), (20)-(28).

Como puede observarse, la solución está dada por un desarrollo ortogonal en series de Fourier-Bessel. Así, para hacer factible el cálculo del campo de temperaturas debe considerarse el desarrollo de un código computacional en un lenguaje de programación conveniente. En el presente trabajo se optó por el lenguaje Fortran 90.

3.2 Verificación de la solución

Con el propósito de verificar la solución de la conducción de calor en el cilindro de dos losas considerando la resistencia térmica de contacto, se procede a reproducir los resultados para el caso en el cual se considera contacto perfecto, es decir R_{th}=0. Una solución para este caso especial fue reportada por Xamán *et al.* (2017).

El sistema consiste en un cilindro de dos capas; una de plomo ($z_0<z<z_1$) y la otra de plata ($z_1<z<z_2$). La Fig. 2 muestra la comparación del campo de temperatura obtenido con la solución de Xamán *et al.* (2017) y con la solución desarrollada en el presente trabajo fijando un valor muy pequeño para R_{th} (1.0E-07 m^{2}K/W). Se observa que la solución proporcionada por el presente trabajo (línea discontinua) reproduce de manera satisfactoria a la solución analítica de referencia (línea continua). En el aspecto cuantitativo se determinó una diferencia máxima de 0.18% en la interfase ($z=z_1$).

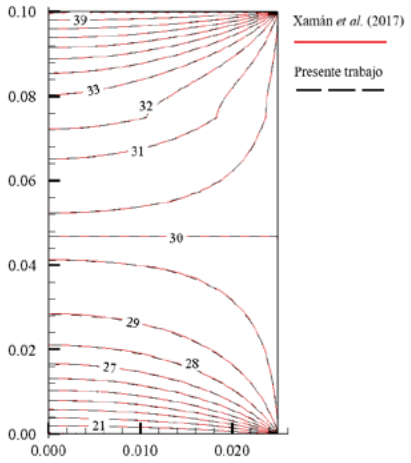


Figura 2. Comparación de isotermas para un cilindro de plata y plomo con contacto perfecto.

Por otro lado, al no existir alguna solución de referencia que considere la resistencia térmica de contacto (contribución de este trabajo), se decidió realizar una verificación de la solución analítica con una solución numérica. Para la solución numérica se utilizó el método del volumen finito con el propósito de discretizar a la Ec. (1) así como a sus condiciones de frontera. Este procedimiento para coordenadas cilíndricas se detalla en Patankar (1980). Los parámetros del sistema considerado fueron: z_0=0, z_1=7.5 cm, z_2=15 cm, T_0=300 K, T_2=400 K, T_a=350 K, plomo como material 1 y plata como material 2. Se consideró una resistencia térmica de 1.0E-04 m^{2}K/W.

La Fig. 3 exhibe la comparación del campo de temperatura en forma de isotermas obtenidas tanto por la solución analítica

ISSN en trámite

(línea continua) así como por la solución numérica (línea discontinua). En ésta se aprecia que las isotermas de la solución numérica se superponen a las correspondientes de la solución analítica en todo el dominio. La interfase de los materiales se indica por la línea turquesa (en z=7.5 cm). En esta región se encontraron las mayores diferencias porcentuales entre ambos enfoques, siendo 0.013% el valor de la diferencia máxima. Debe resaltarse que este error corresponde a la solución numérica con respecto a la solución analítica, ya que esta última es la solución exacta del modelo.

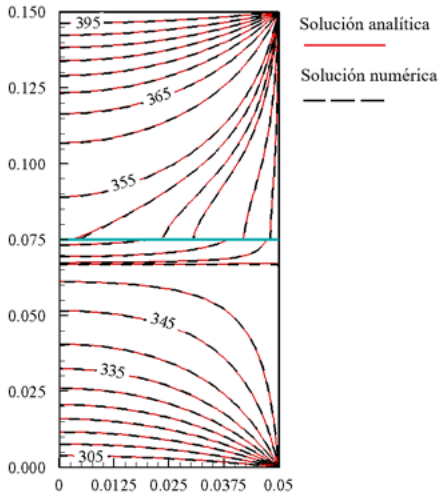


Figura 3. Comparación de isotermas para la solución analítica y la solución numérica.

4. RESULTADOS

Una vez concluido el proceso de verificación, se llevó a cabo un estudio paramétrico para el cilindro de dos medios con resistencia térmica de contacto. El sistema considerado posee las mismas dimensiones y temperaturas descritas en la sección de verificación. El estudio paramétrico trató de un análisis del efecto de la resistencia térmica de contacto sobre el flujo de calor en la interfase de las capas y del efecto de la relación de conductividad térmica entre ambos materiales sobre el flujo de calor en la interfase para distintos valores de R_{th}.

4.1 Efecto de la Resistencia Térmica de Contacto (R_{th})

El sistema para este caso está formado por plata y plomo. En la Figura 4 se observa que, cuando la resistencia térmica de contacto es pequeña, la oposición a la transferencia de calor en la unión de los materiales también lo es. Por lo tanto, el flujo de calor es grande. Se aprecia que inicialmente, se presenta un comportamiento lineal. Sin embargo, en el intervalo de 1E-05 a 1E-04 se llega a un punto de inflexión en donde la gráfica muestra una ligera disminución del flujo. Posteriormente, de 1E-04 hasta 5E-03 m^2K/W se aprecia nuevamente una disminución lineal. No obstante, en esta ocasión se exhibe un comportamiento más acentuado, lo cual indica que existe un decrecimiento considerablemente mayor. Finalmente, en valores muy grandes de R_{th}, específicamente para R_{th}>1E-01 m^2K/W el gráfico muestra una tendencia del flujo hacia un valor muy pequeño.

4.2 Efecto de la relación de conductividades térmicas (K).

Para este estudio, se propuso un parámetro definido como la relación de conductividades térmicas de los dos materiales utilizados ($K=\lambda_1/\lambda_2$). Con la finalidad de analizar el efecto de K sobre el flujo de calor en la interfase, también se considera la resistencia térmica de contacto.

En la Figura 5 se observan las distintas curvas que corresponden a los valores de R_{th} considerados. Se aprecia que existe simetría en todas ellas con relación a K. Para valores pequeños de K se presentan valores moderados en el flujo de calor. A partir de K=5E-03 el flujo de calor incrementa de manera moderada para valores grandes de R_{th} (de 1E-03 a 1E+00 m^2K/W) pero de manera muy severa para valores pequeños de R_{th} (menores a 1E-03 m^2K/W). En todos los casos se alcanzan los valores máximos cerca de K=1.0. En el caso de las resistencias térmicas más pequeñas se presentan los valores de 54, 47 y 26 kW/m^2 para R_{th}=1E-06, 1E-05 y 1E-04 m^2K/W, respectivamente. El flujo de calor máximo decae bruscamente a partir de R_{th}=1E-03 m^2K/W. Esto se debe a que a medida que se aumenta la resistencia, se dificulta la transferencia de calor a través de la interfase. En todos los casos, una vez que se alcanza el valor máximo, a medida que K se incrementa, se presenta una disminución en el flujo de calor. Esta disminución es tal que las curvas son completamente simétricas a la abscisa K=1.0.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló una solución analítica para el problema de conducción de calor en 2-D para un cilindro de dos materiales considerando la resistencia térmica de contacto. Ésta se verificó con una solución numérica y después se realizó un estudio paramétrico. Con base en los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- La solución analítica desarrollada en el presente trabajo puede considerarse como una solución de referencia para un cilindro de dos losas con R_{th} ya que reprodujo satisfactoriamente los resultados de la solución analítica para contacto perfecto, así como la solución numérica para cuando sí existe una resistencia térmica en la interfase.

- Al llevar a cabo el estudio del efecto que tiene la resistencia térmica de contacto en el flujo del calor del sistema, se ratifica que éstos son inversamente proporcionales, ya que un aumento

ISSN en trámite

de R_{th} indica una mayor oposición al paso de energía a través de la interfase de los materiales, provocando a su vez que el flujo de calor sea pequeño.

- El efecto de la razón de conductividades térmicas sobre el flujo de calor mostró que, al contar con una losa de un material conductor y otra de un material aislante, el flujo de calor en la interfase es pequeño. Por el contrario, el mejor de los casos es aquel en el que la resistencia es tan pequeña que se asemeja a contacto perfecto y, además, es necesario que ambos materiales sean altamente conductores, como es el caso $K \approx 1.0$.

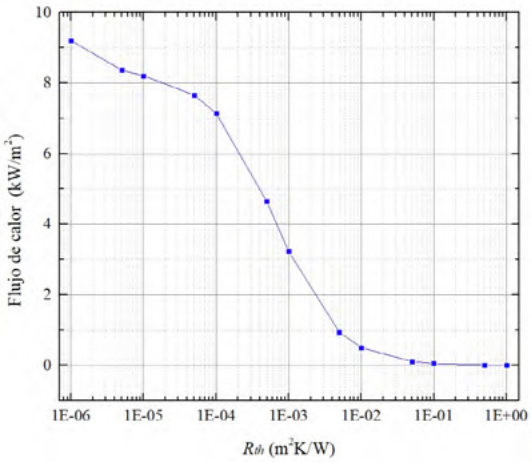


Figura 4. Efecto de R_{th} sobre el flujo de calor.

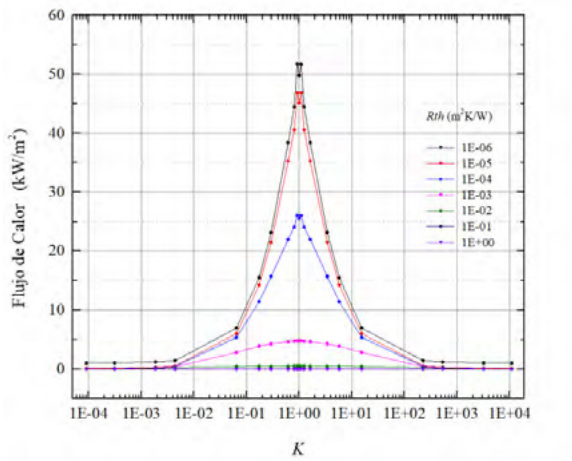


Figura 5. Efecto de K sobre el flujo de calor.

NOMENCLATURA

a	Radio del cilindro [m]
K	Razón de conductividad térmica
$N(\beta_m)$	Norma [m^2]
r	Coordenada radial [m]
R_{th}	Resistencia térmica de contacto [m^2K/W]
T	Temperatura [K]
T^u	Temperatura por arriba de interfase [K]
T^d	Temperatura por debajo de la interfase [K]
z	Coordenada axial [m]
Z	Espesor de losa [m]
β	Valor propio [m^{-1}]
λ	Conductividad térmica [W/mK]
z^+	Coordenada axial por arriba de la interfase [m]
z^-	Coordenada axial por debajo de la interfase [m]

REFERENCIAS

ASTM E 1225 (2004). Standard Test Method for Thermal Conductivity.

de Monte F. (2003). Unsteady heat conduction in two-dimensional two slab-shaped regions. exact closed-form solution and results. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 46:1455-1469.

Esquivel-Ramón J. (2010). *Diseño térmico de un instrumento de barras cortadas para medir conductividad térmica de sólidos conductores*. Tesis de Maestría, CENIDET.

Delouei A.A., Kayhani M.H. y Norouzi M. (2012). Exact analytical solution of unsteady axi-symmetric conductive heat transfer in cylindrical orthotropic composite laminates. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 55:4427-4436.

Jain P.K., Singh S. y Uddin R. (2009). Analytical solution to transient asymmetric heat conduction in a multi-layer annulus. *Journal of Heat Transfer*, 131:011304.

Leyva-Contreras, T. (2022). *Solución exacta de la conducción de calor en un cilindro compuesto considerando la resistencia térmica de contacto.* Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora (UNISON).

Lu X., Trevola P., Viljanen M. y Denme M.K. (2006). Transient analytical solution to heat conduction in multi-dimensional composite cylinder slab. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 49:1107-1114.

ISSN en trámite

Singh S., Jain P.K. y Uddin R. (2008). Analytical solution to transient heat conduction in polar coordinates with multiple layers in radial direction. *International Journal of Thermal Sciences*, 47:261-273.

Wang H.M. y Liu C.B. (2013). Analytical solution of two-dimensional transient heat conduction in fiber-reinforced cylindrical composites. *International Journal of Thermal Sciences*, 69:43-52.

Xamán J., L. Lira-Cortés. y Arce J. (2009). Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus for measuring thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering,* 29:617-623.

Xamán J., Esquivel-Ramón J., Chávez Y. y Hernández-Pérez I. (2017). Numerical simulation of an instrument to determine the thermal conductivity in conductive solids. *Mechanics and Industry*, 18:105.

Yeh F.B. (2007). Prediction of the transient and steady temperature distributions in a two-layer composite slab in contact with a plasma: Exact closed-form solutions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40:3633-3643.

ISSN en trámite

Mechanical characterization of spent- coffee-grounds briquettes

C. Moreno [1], O. Chamarraví [2], E. Navarro[3], M. Jiménez[4]

1- Associate professor. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia
claudio.moreno@profesores.uamerica.edu.co
2- Associate professor. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia,
oscar.chamarravi@profesores.uamerica.edu.co
3- Assistant Professor Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia,
eric.navarro@profesores.uamerica.edu.co
4- Assistant Professor Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia,
miguel.jimenez@profesores.uamerica.edu.co

Abstract: This article provides an overview of the manufacture of briquettes by mixing spent coffee grounds (SCG) and recycled newsprint (RNP), with the following compositions 50:50, 70:30 and 80:20 respectively.

Hollow cylindrical briquettes with approximate dimensions of diameter = 64.4 mm, thickness = 21.34 mm, and average height = 49 mm and weights between 48 and 61 g, were used as samples for mechanical characterization for the research project "Characterization of biomass briquettes type 2 as solid fuel: Alternative to firewood and charcoal in kitchens, restaurants and small businesses, based on the Colombian Technical Standard 2060" conducted at the University of America in Bogota, Colombia. Initially, the design and construction process of a Peterson type press for the manufacture of briquettes was carried out. This press proved to be affordable, reliable, resistant and practical for the compaction of briquettes under the Colombian Technical Standard NTC 2060.

A universal testing machine was used for the mechanical compression tests, obtaining the best result in the samples of 50:50 compositions, with an average load of 219.78 N, Abrasion resistance was measured using a mill adapted to the proposed briquette size, the best value to ensure the least detachment of material from the briquette (less than two percent), was obtained with the 50:50 compositions.

Finally, the breaking strength was evaluated using as a guide the work done by Bhavsar et al (2018) and Asamoah (2016) , in which the samples were dropped in free fall from a height of 1 m several times until they breakage, the best indicator to ensure the physical integrity of the briquettes if they were to suffer an unexpected fall was achieved with the 50:50 composition, As a general conclusion, the composition of these briquettes has good mechanical properties to maintain shape, size and density in the actual process of transportation and storage.

Keywords: briquettes, spent coffee ground, solid biomass

1. INTRODUCTION

Fossil fuels cause greenhouse gases and global warming. In developing countries, mainly in Africa and Asia, the only available energy source for people is the wood obtained from forests and jungles (Enger & Smith, 2010). Therefore, it is necessary to look for clean, inexhaustible, and highly competitive renewable energies such as biofuels.

In this project, briquette production from spent coffee grounds and newsprint as a binder is an alternative to firewood and mineral coal, whose extraction process causes deforestation, and lung pathologies such as emphysema and chronic obstructive pulmonary disease (Nijhuis 2017).

The briquetting press is a device that produces samples in the form of briquettes (usually as a cylindrical block) to evaluate their mechanical and physicochemical properties such as compression strength, shatter and abrasive resistance, heating value, combustion gases, among others. These devices are made to compress briquettes from raw material that generally has a high moisture content. Therefore, this water must be drained while compressing.

The physical-chemical and mechanical properties of briquettes guarantee adequate performance as fuel. Also, they offer optimal integrity and appearance in transport, storage, and distribution. To a large extent, these features are obtained through an adequate pressing process. For these reasons, several experiences needed to be evaluated before constructing the machine.

Design variables and operation conditions were identified to evaluate the mechanisms and size the machine, applying

ISSN en trámite

characterization of materials and manufacturing process concepts.

The main objective is to characterize the briquette of SCG (spent coffee grounds) and RNP (recycled newspaper o newsprint) based on the use of devices such as the briquetting press, the universal testing machine and a rotary drum, to evaluate the mechanical performance of the composite material.

2. EXPERIMENTAL METHODOLOGY

2.1 Design and construction of a Peterson type briquetting press

Following steps were carried out to design and build the briquette press:

- Review of similar projects that entail different models of briquetting machines assembled for diverse materials. Once the review was completed, the most practical, cheap, and easy-to-build device was chosen to adjust it to project requirements, adapting it, or improving some of its mechanisms.
- Determination of necessary parameters of briquettes: basic physical-chemical characteristics of the material to be briquetted (coffee residue and newsprint binder), compression force, size, weight, and shape of the briquette, among others.
- Draft of the previous press design.
- Detailed sketches of the components and parts of the machine.
- Acquisition of materials of the structure or body.
- Acquisition of cylinders to obtain the diameter and dimensions of the briquettes.
- Calculations of the compression system to be applied by the press.
- Design of the drainage system, separation, and extraction of briquettes.
- General drawings of the machine and detailed plans of its parts with the calculated measurements.
- Final assembly of its components and mechanisms, as shown in Figure 1.



Fig. 1. Briquetting machine

Table 1 shows all the specifications of the briquetting machine.

Table 1. Briquetting machine specifications

Briquette Machine Features	
Denomination	Value
Maximal compaction force (kgf/cm^2) – (kN/m^2)	69.299 – 6796
Dimensions (mm)	22 x 10 x 95
Weight (kg)	9.87
Nominal production (briquettes/test)	3
Average product density (g/cm^3)	0.36
Briquetting process performance	Manual and intermittent
Dimensions of hollow cylinder briquette	Diameter = 64.4 mm, thickness = 21.34 mm, and average height = 49 mm

2.2 Manufacture of briquettes

2.2.1 Mixture preparation

Initially magazine, bond and newspaper, were tested as a binder for SCG after several tests, it determined the magazine is difficult to cut and shred, besides, to be less soluble in water. Between bond paper and newspaper, the second got chosen since the briquettes made with this binder turned out to be more compact. Therefore, it was left as the only binder to make the different SCG- compositions

To evaluate the mechanical properties, SCG-RNP compositions of 50-50, 70-30 and 80-20 by weight were elaborated. The preparation of mixture was made by dissolving manually, 1 kg of RNP cut into fine pieces in 4 litres of water. Then it was left to soak for 24 hours (Figure 2). The next day, the soaked paper was weighed for manual mixing with the SCG in compositions SCG-RNP as follows.
Composition 50-50: 0.5 kg of SCG, 0.50 kg of RNP
Composition 70-30: 0.70 kg of SCG, 0.30 kg of RNP
Composition 80-20: 0.80 kg of SCG, 0.20 kg of RNP



Fig. 2 Preparation of mixture

Once the mixtures were made, they were compacted in the Peterson-type briquetting press.

ISSN en trámite

2.2.2 Compaction of mixture

Briquettes use experiences in countries such as Spain, Ukraine, Russia, and the United Kingdom, were analysed. In rural areas, the lack of conventional heating is supplied with chimneys and biomass-based boilers. These systems use biofuels from different biomass such as sawdust, shavings, branches, stems, shells, grains, among others, to produce briquettes or pellets.

In the case of briquettes, Peterson presses are used. These machines are composed of a metallic sheets and wood frame, a hydraulic jack, a drainage system, and a press-molding device.
The manually operated hydraulic jack puts the mixture under pressure of 6.796 MPa. The average dimensions obtained for the selected compositions are shown in figures 3 and 4, together with table 2.



Fig. 3. SCG-RNP briquettes dimensions



Fig. 4. Batch of briquettes made to be tested

Table 2. Average dimensions for different SCG.RNP compositions

Composition	Height (mm)	Thickness (mm)	Diameter (mm)
50:50	48.70	22.48	64.08
70:30	49.75	22.05	64.55
80:20	50.23	22.33	64.65

2.2.3 Drying process

Briquettes made in the Peterson press are exposed directly to sunlight to ensure suitable moisture removal and to give them compaction properties.

2.3 Mechanical characterization of briquettes

2.3.1 Compression strength test

The compression test for briquettes was applied on the SHIMATZU E-50 Universal Testing Machine for eight samples of each composition. As shown in figure 5.



Fig. 5. Compression strength test in universal testing machine.

2.3.2 Shatter resistance test

According to Bhavsar et al (2018), the briquettes shatter resistance was evaluated, dropping them in free fall from a height of 1 m as shown in figure 6. Law et al (2018). Asamoah (2016) also recommend this test. Repetitions were made until the briquette got completely broken in pieces. The initial weight of the entire briquette and the weight of the largest piece were measured and compared to obtain this index with the equation 1.

$$\%\ shatter\ resistance = \left(1 - \frac{w_1 - w_2}{w_1}\right) \times 100 \qquad (1)$$

Where w_1 corresponds to the weight of the complete briquette before impact and w_2 is theweight of the piece plus after impact

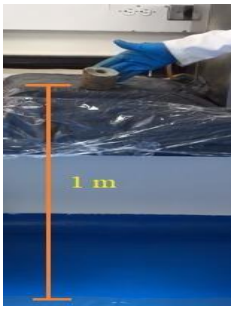


Fig. 6. Shatter resistance test.

ISSN en trámite

2.3.3 Abrasive resistance

According to the stipulations of the EN 15210-2 standard, six samples of briquettes of each composition were subjected to a rotating drum of 20 cm in diameter, 30 cm in length, for 5 minutes by rotating it at 25 rpm (U.N. Española, 2011). The Armfield CEN-MKII-11 didactic ball mill was selected and adapted to the size of the manufactured briquettes as shown in figure 7.



Fig. 7. Armfield CEN-MKII-11 didactic ball mill.

Instead of placing a flat dividing plate on the drum, a sheet of sandpaper 100 was placed on the inner walls to provide the abrasive medium.

The weight of each briquette was measured before and after the test with a precision electronic balance. The abrasion resistance was determined using the final mass in percent after rotation as an indicator, employing the equation 2.

$$\%\ abrasive\ resistance = (1 - \frac{w_1 - w_2}{w_1}) \times 100 \qquad (2)$$

Where w_1 and w_2, correspond to the weight of the briquette before and after rotation in the drum respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The values obtained from the mechanical tests were compared and analysed, with stipulated parameters in the Colombian Technical Standard NTC 2060 and other standards, together with the experiences of different authors who carried out similar tests (ICONTEC 1987).

3.1 Compression strength tests

Figure 8 shows the state of the briquette after the compression test.



Fig. 8. Final appearance of briquette after compression test.

For all the compositions, there was a characteristic deformation in the radial direction. But, as the percentage of RNP binder in the mix decreased, a greater detachment of material took place. Table 3 show the results of this test for the tested briquettes and figure 9 shows the disposition and trend of the data obtained.

Table 3. Strength Compression in (N) for briquettes SCG-RNP

Briquette Composition	Average load (N)	Standard deviation
50:50	219,78165	22,7965282
70:30	97,683925	23,8226605
80:20	80,269138	10,9332847

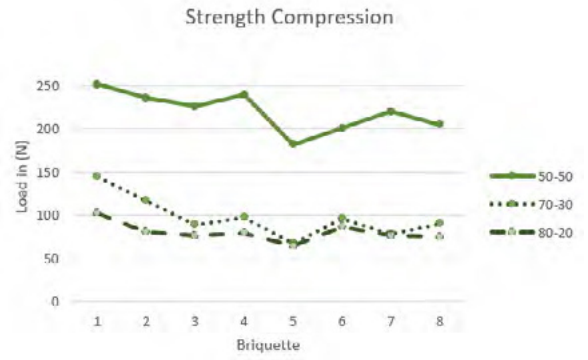


Fig. 9. Graphic behaviour of Strength Compression of briquettes SCH-RNP

According to the NTC 2060 standard, the strength compression for biomass briquettes weighing more than 40 g should not be less than 588.23 N or 60 kgf. In the present project, the samples had weights between 48 and 61 g. The 50:50 composition samples showed better crush resistance when loaded on the universal testing machine (ICONTEC 1987). On average, they supported a load of 219.78 N, alike the values of 97.683 and 80.27 (N) registered by those of 70:30 and 80:20 respectively. The values obtained do not fulfill this requirement, but in similar studies carried out on batches of briquettes with different binders, it is evident that they do not reach this value either. The study carried out by Cubero et al (2014) obtained average fault load values 538.93 N. Balseca et al (2018)

ISSN en trámite

registered an average failure load of 237.74 N. Lisowskis´ test calculated the resistance to crushing stress for SCG pellets at 1.75 MPa, compared to the 68.148 kPa obtained in the present project for the 50-50 composition. However, the value of this last reference would be below that established by this standard. This values are lower than those stated in Standard NTC 2060, because it takes coal as a pattern. According to the graph in figure 15, a marked difference is evident in terms of compressive strength based on the amount of RNP contained. Therefore, it proves that this binder has a notable impact on the increase in resistance to this load condition.

Although the minimum compression or crushing load was under standard requirement, these briquettes would support many briquettes established in table 4 based on their weight and the load held.

Table 4. Number of briquettes held on top

Composition	Maximum load on top (N)	Briquettes stacked on top
50-50	219,78	443
70-30	97,683	153
80-20	80,27	137

3.2 Shatter resistance tests

Table 5 show the results of this test for the tested briquettes and figure 10 shows the disposition and trend of the data obtained.

Note that the number of launches is not the same for each composition, because that is when the total disintegration of the briquette occurs

Table 5. Shatter resistance in (%) for SCG-RNP briquettes

Briquette Composition	Average values (%)	Standard deviation	Number of launches in the free fall
50:50	97,347	1,93143794	20
70:30	53,909	7,12501966	7
80:20	51,069	4,04252242	4

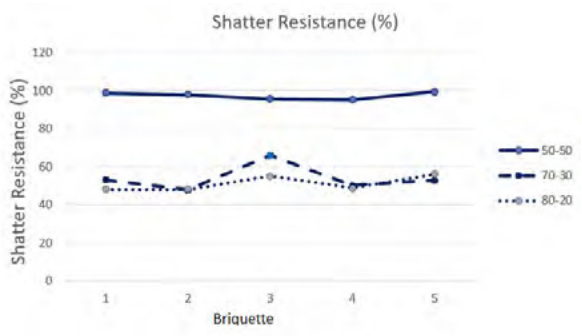


Fig. 10. Graphic behaviour of shatter resistance of briquettes SCG-RNP

The newspaper as a binder improves the compaction of the mixture and prevents the briquettes from collapsing when thrown in free fall. In the experiment, at a large amount of paper, more launches are needed to fragment the briquette. By decreasing its proportion, the briquette becomes more brittle. Bargazan et al., (2014), suggest as suitable values for this indicator those greater than 56%. Law´s test found that coffee grounds develop high impact resistance when agglomerated with rice husk. Approximately 96% was this indicator, while when mixed in different proportions with sugar cane bagasse, this was of almost 100% (Law et al., 2018). Brunerova´s study, found that this indicator improves in SCG briquettes agglomerated with wood shavings or sawdust, but does not give a suitable response to compression (Brunerova et al., 2019).

Regarding this indicator (20 launches in the free fall), the 50:50 compositions would guarantee the physical integrity of the briquettes if they were to suffer an unforeseen fall.

The variation in the graph of the compositions 70:30 and 80:20, refers to the fact that in some briquettes a kind of cracking was initially observed on them.

3.3 Abrasive resistance tests

Table 6 show the results obtained in the abrasion test and figure 11 shows the disposition and trend of the data obtained. According to requirements of NTC 2060, this test must be applied to a batch of 100 briquettes in a rotating drum with a diameter of 1.0 m. The reference for this test was the Standard EN 15210-2. A smaller number of samples are allowed to be subjected to rotation and to evaluate the detachment of material. A sheet of sandpaper 100 was placed on the walls of the drum, rather than a flat barrier inside the drum. In this study 5 tests were performed with each composition. (U.N. Española, 2011)

ISSN en trámite

Table 6. Abrasive resistance in (%) for SCG-RNP briquettes

Briquette Composition	Average values (%)	Standard deviation
50:50	99,0436833	0,29385645
70:30	95,4105000	1,65221905
80:20	92,8270833	3,86789073

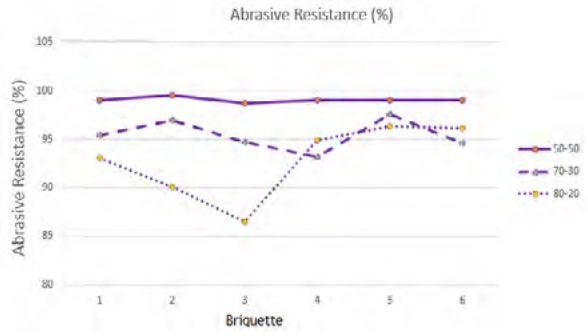


Fig. 11. Graphic behaviour of abrasive resistance of briquettes SCG-RNP.

The test showed the newspaper maintains the physical integrity of the briquettes, detaching less than 2% of material after undergoing the rotation of the drum, the impact between them and the contact with the sandpaper wall. Law carried out the abrasion test or also called durability, for the briquettes of rice husk and mud, obtaining values between 96% and 100%. This resistance increased as the amount of SCG was added. The combination of cane bagasse and SCG remained very close to 100% regardless of composition Law et al., (2018). Brunerova et al (2019) in her study obtained that the abrasion resistance is high in briquettes whose composition consists of 100% sawdust or sawdust - erased in 50-50 or 75-25. On the other hand, this study verified that the resistance of wood chip briquettes had a low resistance to abrasion (below 50%). (Brunerova et al, 2019). The results of this test obtained in the present study suggest that the combination of SCG with RNP makes the briquette highly resistant to abrasion. In practical applications these briquettes would not present significant material detachment, when colliding with each other as would happen in transportation. Their integrity, presentation and performance in the combustion process would not be affected.

4. CONCLUSIONS

The machine can work with different granulated or powdered products, similar to those already studied in this article, as it offers a wide range of compacting forces. In the whole design process, it was used the highest number of easily available materials and standardized screws. The production of briquettes based on biofuels aids the creation of articles that substitute wood and hydrocarbons and encourages research for clean and renewable energy sources.

.

Despite not having reached the compressive strength limit, the briquettes showed high axial load support values. In practice these briquettes can support a considerable quantity of briquettes stacked on top of each other. This result ensures that they will not be disintegrate when arranged in boxes.

The briquettes, whose composition was 50-50, showed a high resistance to impact. They required several launches to show material detachment which was less than two percent. This composition would guarantee that in the event of accidental falls such as those that can occur in loading and transport processes, its integrity or shape will not be affected. As the binder content gets reduced, they become more brittle.

The 50-50 composition showed good abrasion resistance when rotated against sandpaper covered walls. Detached material was less than two percent, unlike compositions with less binder. In practice, this behaviour showed the fact that the contact between briquettes or the friction between them would not produce material losses when packed in boxes. It is not necessary to put cardboard or separation divisions inside, which would save costs for this concept.

These mechanical tests showed that RNP, contributes significantly to improve mechanical properties of briquettes based on coffee grounds. In addition to being a readily available material.

REFERENCES

Asamoah, B., Nikiema, J., Gebrezgabher, S., Odonkor, E., & Njenga, M. (2016). A review on production, marketing and use of fuel briquettes. International Water Management Institute (IWMI). https://doi.org/10.5337/2017.200

Balseca-Sampedro, O. F., López-Ortiz, S. A., Viteri-Núñez, E. F., Analuisa-López, D. S., & Hernández-Gavilanes, E. V. (2018). Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (BORRA) como biocombustible sólido. Polo del Conocimiento, 3(7), 420. https://doi.org/10.23857/pc.v3i7.565

Bazargan, A., Rough, S. L., & McKay, G. (2014). Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel. Biomass & Bioenergy, 70, 489-497. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.015

Bhavsar, P. A., Jagadale, M. H., Khandetod, Y. P., & Mohod, A. G. (2018). Proximate Analysis of Selected Non Woody Biomass. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 7(9), 2846-2849. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.709.353

ISSN en trámite

Brunerová, A., Roubík, H., Brožek, M., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D., & Herák, D. (2019). Valorization of Bio-Briquette Fuel by Using Spent Coffee Ground as an External Additive. Energies, 13(1), 54. https://doi.org/10.3390/en13010054

Cubero-Abarca, R., Moya, R., Valaret, J., & Tomazello Filho, M. (2014). Use of coffee (Coffea arabica) pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation. Ciência E Agrotecnologia, 38(5), 461-470. https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000500005

E. D. Enger y B. F. Smith, Environmental Science, 12 th ed., Singapore: Mc Graw Hill, 2010.

Law, H. C., Gan, L. M., & Gan, H. L. (2018). Experimental Study on the Mechanical Properties of Biomass Briquettes from Different Agricultural Residues Combination. MATEC Web of Conferences, 225, 4026. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822504026

Lisowski, A., Olendzki, D., Świętochowski, A., Dąbrowska, M., Mieszkalski, L., Ostrowska-Ligęza, E., Stasiak, M., Klonowski, J., & Piątek, M. (2019). Spent coffee grounds compaction process: Its effects on the strength properties of biofuel pellets. Renewable Energy, 142, 173-183. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.114

Nijhuis, M., 2017. Three billion people cook over open fires — with deadly consequences. National Geographic, disponible en: https://www.nationalgeographic.com/photography/proof/2017/07/guatemala-cookstoves/;

Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC – Norma Técnica Colombiana 2060. Briquetas combustibles para uso doméstico. (1987).

UNE Normalización Española – Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 2: Briquetas. Available in https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0046942. Accessed 12 december 2021.

ISSN en trámite

Evaluación del Desgaste de Prótesis de Cadera con Inserto Acetabular de UHMWPE y Cabeza Femoral de Acero 316L con Recubrimiento de DLC, por medio de Simulación de Elemento Finito.

Daniel Sánchez Pulido*. José María Rodríguez Lelis**

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Palmira, C.P. 62490 México (e-mail: m20ce054@cenidet.tecnm.mx).*
***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Palmira, C.P. 62490 México (e-mail: jose.rl@cenidet.tecnm.mx).*

Resumen: En el presente trabajo se muestra la simulación numérica por elemento finito del contacto y desgaste de prótesis de cadera con inserto acetabular de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE, por sus siglas en inglés) y cabeza femoral de acero 316L con y sin recubrimiento de diamante sintético (DLC, por sus siglas en inglés). Con el objetivo de encontrar una alternativa para la disminución del desgaste en prótesis de polietileno-metal. Se consideró condiciones estándar de un ciclo de marcha de movimiento de la cadera, establecido por la norma ISO 14242-1. Aunque estas simulaciones tienen limitantes que pueden generar diferencias con una condición real, aporta información sobre las diferencias entre materiales y recubrimientos usados en prótesis. De las simulaciones, se concluye que recubrimiento con DLC muestra ventajas como la disminución del esfuerzo cortante por fricción y del desgaste lineal.

Palabras claves: Prótesis de cadera, desgaste, elemento finito, contacto, vida útil.

1. INTRODUCIÓN

La población que sufre diversas afectaciones como el desgaste articular de la cadera, artritis reumatoidea, fractura del cuello femoral, entre otras; deben someterse a una artroplastia total de la cadera, la cual es una cirugía que consiste en introducir una prótesis total de cadera (Gómez García, 2014). Estas prótesis de cadera están integradas por un vástago, una cabeza femoral y una copa acetabular que esta integrada por un cotilo y un inserto acetabular, como se muestra en la figura 1. Estos componentes deben sustituir y emular el movimiento del fémur, la cabeza femoral y acetábulo natural, respectivamente (González Parada, 2015).

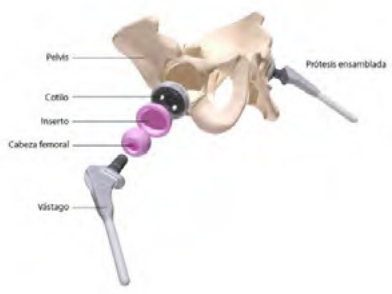


Fig. 1 Prótesis total de cadera *(*Tipos de prótesis de cadera - MBA blog*, 2018)*

Las prótesis de cadera actuales usan en la copa acetabular materiales metálicos como el Acero 316L y aleaciones cobalto-cromo-molibdeno, también se usan materiales cerámicos como la alúmina (Oxido de aluminio), estas copas acetabulares generalmente tienen un inserto de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE, por sus siglas en inglés). Las cabezas femorales se fabrican con Acero 316L, aleaciones de titanio Ti-6Al-4V, alúmina y zirconia. Los vástagos femorales se fabrican con materiales metálicos como aleaciones de titanio y acero 316L. Se denomina par de articulado a las diferentes combinaciones de copa acetabular – cabeza femoral. Los pares de articulados existentes son cerámica-cerámica, metal-metal, cerámica-polietileno y metal-polietileno siendo éstos los más utilizadas (Charnley and Brand, 2010; Gómez García, 2014; Galia et al., 2017; Merola and Affatato, 2019)

La principal problemática de las prótesis de cadera actuales es que tienen un tiempo de vida útil se encuentra entre 10 y 15 años (Galia et al., 2017; Traumatopedia, 2022), por lo cual no logra sobrepasar la esperanza de vida de un gran porcentaje de los pacientes después de someterse a la artroplastia total de la cadera. Por esta razón, muchos pacientes deben someterse a una segunda cirugía de reemplazo parcial o total. Esto genera procesos riesgosos en los pacientes y también altos gastos en cirugías de reemplazo de cadera (Gómez García, 2014; Secretaría de Salud, 2018). Los principales factores que reducen la vida útil de las prótesis de cadera son la fractura mecánica en el vástago femoral y el aflojamiento aséptico

ISSN en trámite

generado por el desgaste en la superficie de contacto de la copa acetabular. Debido a las partículas generadas por el desgaste, ocurre un proceso de osteólisis, que es la destrucción y reabsorción ósea generada por una reacción biológica a las partículas, por lo cual la osteólisis es otra causa de falla en las prótesis de cadera (Reyes de la Parra, 2019).

Debido a que el principal factor en la reducción de la vida útil de las prótesis de cadera con inserto de polietileno es el desgate debido al contacto entre los pares articulados, se han realizadas diversas investigaciones mediante revisión clínica, de manera experimental (*in vitro*) y recientemente por medio de simulaciones numéricas

De los estudios por revisión clínica en prótesis extraídas de pacientes se identificó un desgaste de 0-0.008 mm/año en polietileno contra cerámica y un desgaste de 0.005-0.24 mm/año de polietileno contra metal (Galia et al., 2017) (Gómez García, 2014). Otra forma de análisis es la experimental *in vitro*, a través de máquinas simuladoras de desgaste en donde se someten a las prótesis a las condiciones de contacto existentes en la cadera. Debido a que estas condiciones varían mucho dependiendo de cada paciente, se han originado estándares como la norma ISO 14242-1 la cual indica los parámetros de las pruebas (Mattei et al., 2020) (Hua & Li, 2020). Estos análisis se hacen con la finalidad de encontrar soluciones para la disminución del desgaste. Sosa et al., 2006 analizaron de forma experimental el desgaste de prótesis de cadera con cabezas femorales de cerámica (oxido de aluminio) recubiertas por diamante sintético (DLC, por sus siglas en inglés) por medio de triboadhesión, como propuesta para la disminución del desgaste, debido a las características tribológicas del DLC (Brühl, Dalibón and Nahuel, 2016). Encontraron un aumento de la resistencia al desgaste de aproximadamente el 300% con el uso del DLC (Sosa González, 2004).

Debido a lo anterior, se dispusó a analizar las características de contacto y el desgate de forma cuantitativa por medio de simulaciones numéricas de elemento finito, este análisis se aplicó en cabezas femorales de acero el cual es un material menos costoso que la cerámica. Las simulaciones del desgaste por elemento finito, son métodos recientes que pueden llegar a permitir el ahorro de pruebas experimental y aportan información cuantitativa importante. La mayoría de los trabajos usa la norma ISO 14242-1 como condiciones de frontera y la ley de Archard como método de desgaste (Hua et al., 2014) (Wang et al., 2019)(Shankar, 2014) (Jaqués Carnicer, 2016). Hua et al., 2014 simuló por elemento finito el desgaste de prótesis de polietileno-metal, y validó sus resultados con simulaciones experimentales.

2. METODOLOGÍA

Se propone el uso de este recubrimiento en cabezas femorales de acero 316L. Para obtener información cualitativa de los efectos del recubrimiento con DLC por triboadhesión, se desarrollaron simulaciones numéricas por elemento finito de prótesis de cadera de UHMWPE - acero 316L con y sin recubrimiento de DLC. Las simulaciones se realizaron con el Software Abaqus usando un análisis dinámico.

2.1 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales son los mostrados en la .

Tabla **1**, se asumió un comportamiento isotrópico.

Tabla 1. Propiedades de los materiales a utilizar en la simulación de las prótesis de cadera

Material	UHMWPE	DLC	Acero 316L
Módulo de elasticidad (GPa)	1	1000	200
Coeficiente Poisson	0.22	0.1	0.3
Esfuerzo de cedencia (MPa)	28	---	170
Energía superficial (J/m2)	0.031	0.05	4.24
Densidad (kg/m3)	944	3515	7950

2.2 Condiciones de frontera

Se tomó en consideración las condiciones de un ciclo de marcha estandar, en donde se replica las condiciones de caminata. Para la condicion de carga se selecciono la carga axial por el peso del cuerpo y por fuerza abductora, como se muestra en la figura 2.De acuerdo con la literatura, considerar unicamente la carga axial por el peso del cuerpo y fuerza abductora, es suficiente para simular las condiciones de carga en pruebas experimentales de protesis de cadera. Ya que las fuerzas generadas por otros musculos solo representan menos del 1% de la magnitud de carga en la cadera.(Stolk, Verdonschot and Huiskes, 2001; Wendt, 2004).

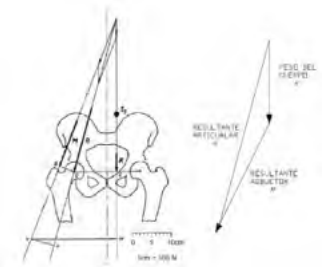


Fig. 2 Esquema de cargas en la cadera (Wendt, 2004).

ISSN en trámite

Dicha carga se aplicó como carga concentrada sobre el punto central de la cabeza femoral, simulando la fuerza de reacción de la cadera, la cual tiene direccion opuesta a la mostrada en la figura 3. De acuerdo a la literatura en simulacion por elemento finito de portesis de cadera, esta es la manera adecuada de modelar la carga (Wang *et al.*, 2019). La cual tiene una magnitud variable como se muestra en la Gráfica 1, utilizando el comportamiento de carga propuesto por la norma ISO 14242-1 y la escala propuesta por por Abúndez P. et al., 2006. Se aplicó las rotaciones de flexión-extensión, aducción-abducción e interna-externa (FE–AA–IER) sobre la cabeza femoral (Gráfica 2). Estos datos se tomaron de la norma ISO 14242-1 (*ISO 14242-1:2014 - Implants for surgery*, 2014). Se consideró una restricción de empotramiento en la superficie exterior de la copa acetabular.

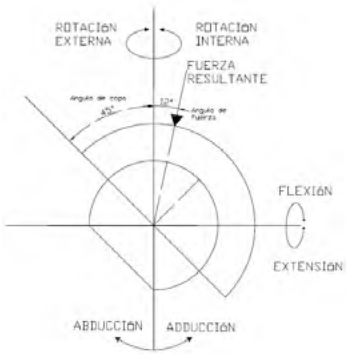
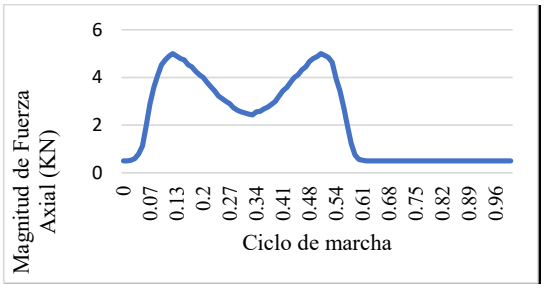
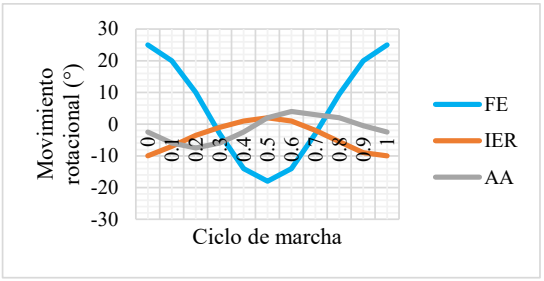


Fig. 3 Condiciones de carga y movimiento en prótesis de cadera (Abúndez P. *et al.*, 2006).



Gráfica 1 Variación de la carga axial en un ciclo de marcha de acuerdo con la norma ISO 14242-1.



Gráfica 2 Variación de los movimientos de la cadera en un ciclo de marcha de acuerdo con la norma ISO 14242-1.

2.3 Mallado

En el mallado se usaron elementos hexaédricos (C3D8R). Los cuales, se recomiendan para analisis de contacto. Se realizó un análisis de sensibilidad de malla, con respecto a la presión de contacto. A partir de esto, se seleccionó un mallado con un tamaño de elemento de 0.85 mm y 56744 elementos.

2.4 Propiedades del contacto

Para las propiedades de contacto entre la cabeza femoral y la copa acetabular, en la dirección normal se usó el método de penalización. Para la dirección tangencial se usó el método de multiplicador de Lagrange, el cual cumple con las restricciones de adherencia en la interfaz. Se usó un coeficiente de fricción de μ=0.25 para el par UHMWPE – Acero 316L que se obtuvo de la literatura (Rodríguez *et al.*, 2010) y para el par UHMWPE – DLC se usó μ=0.1667 que se obtuvó de manera analítica por medio del modelo de Rabinowicz.

Para el recubrimiento de DLC se implementó una capa "cascarón" de 4 μm de espesor, de acuerdo con la literatura este es el espesor que se logra obtener el proceso de triboadhesión en aceros (Colin Ocampo, 2004).

Como condiciones de contacto, se estableció un método de discretización de contacto de superficie sobre superficie, donde la superficie maestra es la cabeza femoral y la superficie esclava es la copa acetabular.

2.5 Desgaste

Para ser el cálculo del desgaste se tomó el modelo de Archard del desgaste abrasivo (Archard, 1953) (1). El cual indica que el volumen del material desgastado V es proporcional con la fuerza normal F_N, a la distancia recorrida y al coeficiente de desgaste adimensional K e inversamente proporcional a la dureza del material más blando σ_0.

$$V = \frac{K * F_N}{\sigma_0} x \quad (1)$$

ISSN en trámite

Si se divide esta ecuación entre el área de aplicación de la fuerza normal y unificando el coeficiente de desgaste adimensional K y la dureza σ_0 en un coeficiente K* con dimensiones (m3/Nm). De esta manera, se obtiene una expresión para el desgaste lineal (2), en términos de K*, la presión de contacto (P_{cont}) y la distancia de deslizamiento x.

$$W_L = K^* * P_{cont} * x \quad (2)$$

Con la expresión anterior y utilizando un método similar al de Hernández et al. (Hernández and Riera, 2015) se calculó el desgaste lineal en copa acetabular usando las variables de salida de la simulación en Abaqus. Introduciendo un *script*, que calcula el desgaste lineal en cada nodo y en cada incremento de tiempo n.

$$W_L = \sum K^* * CPRESS_i * CSLIP2_i \quad (i=1,\ldots,n) \quad (3)$$

Donde:

W_L= Desgaste lineal en cada incremento de tiempo

$CPRESS_i$ = Presión de contacto en cada incremento de tiempo

$CSLIP2_i$ = Distancia de deslizamiento en cada incremento de tiempo

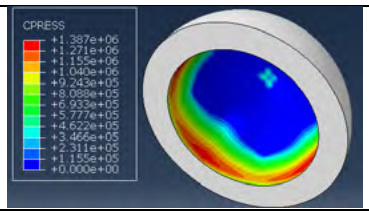
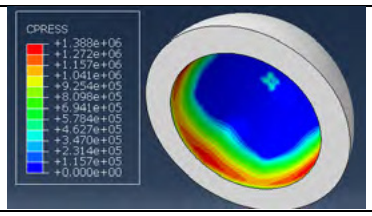
K* = Coeficiente de desgaste

Para el par UHMWPE – Acero 316L se utilizó un coeficiente de desgaste K* igual a 2.126e-11 m3/Nm (Rodríguez *et al.*, 2010). Y para el par UHMWPE – DLC se utilizó un coeficiente de desgaste K* igual a 1.4953e-15 m3/Nm obtenido de manera numérica por C. Maza (Maza Valle, 2009).

3. RESULTADOS

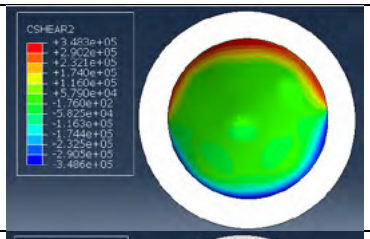
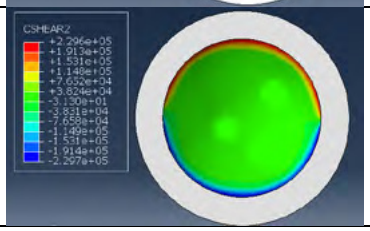
En la Tabla 2 se presentan los resultados de la presión de contacto entre la copa acetabular y cabeza femoral, en un 40% donde se encuentra la carga máxima sobre la cadera. Se observa que no existe variación significativa en la presión de contacto entre dos modelos, ya que la variación es de 1%.

Tabla 2. Presión de contacto en copa acetabular (DLC – UHWMPE)

	Acero 316L sin DLC
	Acero 316L con DLC

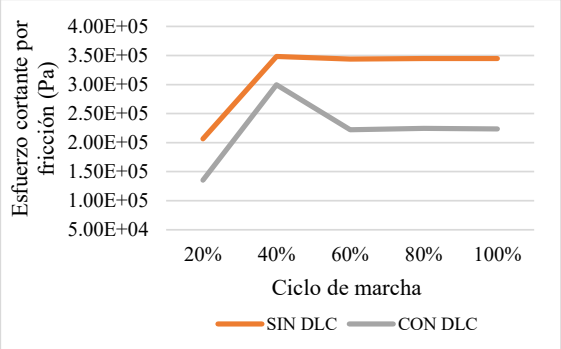
En la Tabla 3 se comparan los esfuerzos cortantes por fricción de los pares Acero 316 L – UHWMPE y DLC – UHWMPE. Se observa una disminución de los esfuerzos cortantes de contacto en el par DLC – UHWMPE, esto debido a la disminución del coeficiente de fricción y energía de adhesión por el recubrimiento de DLC. Esto presenta una ventaja ya que, para los modelos relacionados con el desgaste erosivo y adhesivo, el volumen del desgaste es proporcional al trabajo de fricción (Popov, 2019), que está relacionado con los esfuerzos cortantes presentados.

Tabla 3 Esfuerzo cortante por fricción en copa acetabular (50% del ciclo de marcha)

	Acero 316L sin DLC
	Acero 316L con DLC

En la Gráfica 3 se muestra la variación de la magnitud máxima del esfuerzo cortante por fricción durante el ciclo de marcha, esta magnitud se encuentra en el borde de la copa acetabular. Se observa que este esfuerzo siempre es menor el modelo con recubrimiento de DLC.

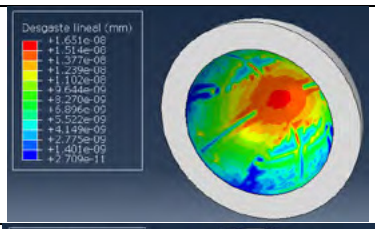
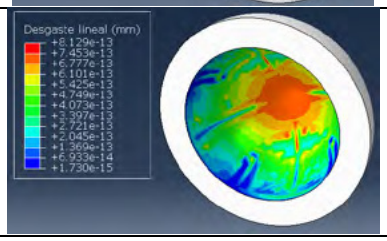
ISSN en trámite



Gráfica 3 Esfuerzo cortante por fricción máximo en copa acetabular durante un ciclo de marcha

En la Tabla 4 se compara el desgaste lineal después de un ciclo de marcha, de los pares Acero 316 L – UHWMPE y DLC – UHWMPE. Se observa que en el par con DLC hay una disminución del desgaste en un orden cinco veces menor que en el par sin DLC.

Tabla 4 Desgaste lineal (ciclo de marcha completo)

	Acero 316L sin DLC
	Acero 316L con DLC

4. DISCUSIÓN

Las simulaciones de desgaste usando elemento finito son solo estimaciones que pueden diferir de un modelo real, debido a procesos complejos como el desgaste por tribocorrosión y erosivo y la variación del coeficiente de desgaste K debido a las deformaciones plásticas entre las asperezas (Popov, 2019), los cuales no se pueden modelar por elemento finito considerando escalas macroscópicas. A pesar de ello, estas simulaciones proporcionan información cualitativa importante, ya que las zonas de mayor desgaste obtenidas por elemento finito coinciden con las zonas de mayor desgaste en pruebas experimentales.

5. CONCLUSIÓN

Los valores máximos de presión se encuentran en un 50% de ciclo de marcha y en la zona central y en borde de la copa acetabular. Los valores de esfuerzo cortante por fricción son menores en prótesis con DLC, los cuales representan aproximadamente un 65% de la magnitud de los valores sin DLC. Esto es indicio de la disminución del desgaste adhesivo y erosivo con el uso del DLC. Las zonas de mayor desgaste lineal se encuentran en centro de la copa acetabular y las zonas cercanas al borde izquierdo. Teniendo una disminución del desgaste en par con recubrimiento de DLC.

REFERENCIAS

Abúndez P., A. *et al.* (2006) "Evaluación del desgaste de prótesis cerámicas de cadera recubiertas con DLC por triboadhesión Parte I - Diseño de la máquina de deposición y desgaste," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, XXVII(1), pp. 23–30.

Archard, J.F. (1953) "Contact and rubbing of flat surfaces," *Journal of Applied Physics*, 24(8), pp. 981–988. doi:10.1063/1.1721448.

Brühl, S.P., Dalibón, E.L. and Nahuel, J. (2016) "Recubrimientos En Base Carbono Tipo 'Dlc' Caracteristicas, Propiedades Y Aplicaciones," pp. 11–18. Available at: http://ria.utn.edu.ar/xmlui/handle/20.500.12272/4165.

Charnley, J. and Brand, R.A. (2010) "The bonding of prostheses to bone by cement," in *Clinical Orthopaedics and Related Research*. Springer New York LLC, pp. 3149–3159. doi:10.1007/s11999-010-1545-8.

Colin Ocampo, J. (2004) *"UN MODELO EXPERIMENTAL" EN EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO DE SUPERFICIES POR MEDIO DE FRICCIÓN SECA*.

Galia, C.R. *et al.* (2017) "Total hip arthroplasty: a still evolving technique," *Revista Brasileira de Ortopedia (English Edition)*, 52(5), pp. 521–527. doi:10.1016/j.rboe.2016.09.011.

Gómez García, F. (2014) "Tribología moderna en artroplastía total de cadera: pros y contras," *scielo*, 28(5)(Acta ortopédica mexicana). Available at: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2306-41022014000500010 (Accessed: November 19, 2020).

González Parada, C. (2015) *Evolución de la indicación de artroplastia total de cadera y recambio de artroplastia total*

ISSN en trámite

de cadera en Andalucía. Universidad de Málaga. Available at: https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/11735.

Hernández, R. and Riera, M.D. (2015) "SIMULACIÓN DE FENÓMENOS DE DESGASTE MEDIANTE EL USO DE ABAQUS/SCRIPTING," (October), pp. 1–7.

Hua, X. *et al.* (2014) "Experimental validation of finite element modelling of a modular metal-on-polyethylene total hip replacement," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 228(7), pp. 682–692. doi:10.1177/0954411914541830.

ISO 14242-1:2014 - Implants for surgery (2014). Available at: https://www.iso.org/standard/63073.html (Accessed: March 17, 2021).

Jaqués Carnicer, A. (2016) *Modelo de desgaste en prótesis de cadera: análisis por elementos finitos*. Universidad de Zaragoza. Available at: http://zaguan.unizar.es/TAZ/EUCS/2014/14180/TAZ-TFG-2014-408.pdf.

Mattei, L. *et al.* (2020) "Experimental investigation on wear map evolution of ceramic-on-UHMWPE hip prosthesis," *Tribology International*, 143. doi:10.1016/j.triboint.2019.106068.

Maza Valle, C.A. (2009) *Una aproximación al modelado de desgaste por el método de elemento finito*, *Cenidet.Edu.Mx*. Available at: http://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/ME Eduardo Benedicto Lopez Montero 2007.pdf.

Merola, M. and Affatato, S. (2019) "Materials for hip prostheses: A review of wear and loading considerations," *Materials*. MDPI AG. doi:10.3390/ma12030495.

Popov, V.L. (2019) *Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia.* 3rd edn. UNIVERSITAT D´ALACANT. doi:https://doi.org/10.14198/pua.2020.meccon.

Reyes de la Parra, V. (2019) "Aflojamiento aséptico en la prótesis total de cadera," *Ortho-tips*, 15(4), pp. 206–213. doi:10.35366/94046.

Rodríguez, R.G. *et al.* (2010) "Análisis experimental del desgaste entre UHMWPE y acero inoxidable 316L empleados en la manufactura de prótesis coxofemorales," pp. 67–85.

Secretaría de Salud (2018) *Especialistas realizan cirugías óseas de mínima invasión*. Available at: https://www.gob.mx/salud/prensa/141-especialistas-realizan-cirugias-oseas-de-minima-invasion?fbclid=IwAR29v9N4HedZD9eMWt530I0D8uJvP-3d7Rsz18mPl5u_7bifzlKNhKuICaw (Accessed: November 24, 2020).

Shankar, S. (2014) "Predicting wear of ceramic–ceramic hip prosthesis using finite element method for different radial clearances," *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*, 8(4), pp. 194–200. doi:10.1179/1751584X14Y.0000000077.

Sosa González, W. (2004) *Diseño de un mecanismo para la evaluacion del desgate en prótesis de cadera*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Stolk, J., Verdonschot, N. and Huiskes, R. (2001) "Hip-joint and abductor-muscle forces adequately represent in vivo loading of a cemented total hip reconstruction," *Journal of Biomechanics*, 34(7), pp. 917–926. doi:10.1016/S0021-9290(00)00225-6.

Tipos de prótesis de cadera - MBA blog (2018). Available at: https://www.mba.eu/blog/tipos-de-protesis-de-cadera/ (Accessed: April 2, 2022).

Traumatopedia (2022) *Cuanto tiempo dura una prótesis - ¿Tengo que cambiarla? - Traumatopedia*. Available at: https://traumatopedia.com/cirugia-protesica/cuanto-tiempo-dura-la-protesis/ (Accessed: May 5, 2022).

Wang, L. *et al.* (2019) "Finite element analysis of polyethylene wear in total hip replacement: A literature review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 233(11), pp. 1067–1088. doi:10.1177/0954411919872630.

Wendt, Z. (2004) *Entwicklung eines physiologischen Simulators für Verschleißuntersuchungen an Hüftendoprothesen*. Technischen Universität Berlin. doi:10.14279/depositonce-979.

ISSN en trámite

SISTEMA DE REHABILITACION "PES" MARK I

Salazar Miranda I.S.[*1], Camacho Serrano J.M.[1], Castillo Velázquez C.[1], Barradas Hernández R.[1], Lazo González B. A.[1] y Muños Pizarro P.A.[1]

[1]Tecnico Superior Universitario en Mecatrónica Área Automatización, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Av. Universidad No. 350 Carr. Fed. Cuitláhuac - La Tinaja Localidad Dos Caminos, Cuitláhuac, Veracruz, México.

[*]Autor para correspondencia: 20203i1010172@utcv.edu.mx

Resumen: El presente articulo describe el desarrollo de un sistema de rehabilitación para extremidades superiores, enfocándose en las articulaciones del hombro y codo. El sistema utiliza un par de motores de corriente directa en conjunto de un algoritmo en el software para realizar un movimiento angular que mejorará las articulaciones antes mencionadas. El sistema tiene dos modalidades, una donde se ejercita de forma activa las articulaciones sin asistencia de los motores y el paciente encargándose por fuerza propia de la mecánica del movimiento, y otra donde se ejercita de forma pasivo/asistida volviéndose en una operación de régimen automático; así mismo se utiliza una cámara que por medio de visión artificial que retroalimenta como entrada los movimientos del paciente. Además, cuenta con una interfaz visual para poder observar y graficar distintas magnitudes que ayudan al fisioterapeuta a conseguir los objetivos de rehabilitación propuestos para el paciente.

Palabras claves: Algoritmo, Automático, Angular, Cámara, Motor, Visual.

I. INTRODUCCIÓN

La Real Academia Española define la rehabilitación como: "Conjunto de técnicas y métodos que sirven para recuperar una función o actividad del cuerpo que ha disminuido o se ha perdido a causa de un accidente o de una enfermedad."

La rehabilitación en Latinoamérica se inició alrededor de los años 40, siendo sus médicos pioneros los ortopedistas, que vislumbraron la necesidad de integración del discapacitado. Actualmente en México, hay 1500 fisiatras para una población de 112.000.000. [1]

Algunos de las formas de rehabilitación que hay son las siguientes:

- Ejercicios para mejorar el habla, lenguaje y comunicación de una persona tras una lesión cerebral.
- La modificación del entorno domiciliario de una persona mayor para mejorar su seguridad e independencia en el hogar y reducir el riesgo de caídas.
- Ofrecer ejercicios y educar a las personas con cardiopatías para que lleven una vida saludable.
- Fabricar y ajustar una prótesis y enseñar al paciente a utilizarla tras la amputación de una pierna.
- Técnicas de posicionamiento y colocación de férulas para asistir en la cicatrización de la piel, reducir la hinchazón y recuperar el movimiento tras una intervención quirúrgica por quemadura.
- Prescribir medicamentos para reducir la rigidez muscular en los niños con parálisis cerebral.
- El apoyo psicológico a las personas con depresión.
- Enseñar a las personas con pérdida de visión a utilizar un bastón blanco.

Las lesiones de miembro superior ocasionan un profundo impacto en la calidad de vida del paciente. Es bien conocido que, para la recuperación del paciente, debe permitírsele jugar un papel activo en su proceso de rehabilitación. Por esta razón, las nuevas tecnologías como la robótica, se están implementando para abordar este problema; tal como lo presentan las múltiples investigaciones reportadas en la literatura [2].

Hoy en día, la rigidez en el codo y hombro suelen ser un problema bastante usual a la hora de la rehabilitación según muchos fisioterapeutas en México y el mundo.

La rigidez de codo se define como la pérdida del arco de movilidad del codo secundariamente a un traumatismo, cambios degenerativos, traumatismos craneoencefálicos, quemaduras o problemas neuromusculares [3].

Se sabe que día a día, se usa uno de los miembros superiores o ambos para todo tipo actividades, pero en ocasiones, llegan a presentar lesiones ya sean traumáticas, como por la práctica deportiva y accidentes o bien, por exceso de uso como cuando la actividad del paciente trabajo implica usar un teclado o cargar objetos pesados.

Por lo antes mencionado, son las lesiones de los miembros superiores los que representan un gran número de problemas en

ISSN en trámite

el consultorio ortopédico y de rehabilitación. Si bien se sabe que, para llegar a una rehabilitación, la extremidad permanece inmovilizada por un periodo de tiempo prolongado, pero a su vez esto conlleva que se forme fibrosis en las articulaciones que provoquen que queden inmovilizadas, acarreando problemas dolorosos para el paciente.

Para el personal rehabilitador, los usos de dispositivos automáticos de rehabilitación presentan un reto que puede provocar que la rehabilitación del paciente sea tardada o incluso llevarse a cabo hasta el final del tratamiento, una de los desafíos es que los dispositivos puedan tener la facilidad para adaptarse a las necesidades médicas del paciente, así mismo, para los diseñadores que deben presentar propuestas de sistemas que sean atractivos, innovadores y motivadores para el paciente [4].

De la misma manera, en los centros de atención médicos y/o de rehabilitación se requiere de una atención personalizada y guiada para cada paciente, en la mayoría de los casos, no puede ejecutarse programas de rehabilitación simultáneo para cada paciente, esto porque cada caso es difererente, de esta manera, aparece la necesidad de que se cuente con alguna propuesta para que el paciente pueda llegar al punto de ejecutar su rehabilitación sin la estricta presencia de un rehabilitador, por lo tanto, los diseños de los sistemas de rehabilitación deberán tener la necesidad de proveer cierta autonomía a los pacientes [5].

El adecuado tratamiento y recuperación automatizado de los pacientes son vitales para mantenerlos independientes y autónomos, al no ser de esta manera, se podría inducir de padecer nuevas afecciones puede provocar nuevas lesiones, impidiendo la recuperación efectiva del paciente.

En cuando al sistema oseo humano, específicamente el de los miembros superiores se compone de brazo, antebrazo, mano y dedos. El miembro superior articula movimientos desde el triángulo formado por la clavícula y el eje compuesto por la espina y el acromión en el opuesto, siendo la bisectriz de este triángulo el eje constituido por la fosa supraespinosa y la apófisis coracoides. La base de este triángulo está dada por el eje virtual que se establece entre el borde superior de la fosa supraespinosa y la carilla esternal de la clavícula [6].

Los miembros superiores son de suma importancia en lo cotidiano para realizar diversas actividades, a través de ellos podemos comer, acariciar, vestirnos, asearnos y diversas actividades más, que parecen sencilas por su simpleza día a día. Entrenando movimientos, se puede aprender, realizar y dominar actividades deportivas como nadar, lanzar una pelota, soportar nuestro propio peso sostenido de una barra o actividades de precisión, así mismo, escribir, pintar, realizar una cirugía, etcétera. Su grado de evolución y desempeño permite distinguirnos de otras especies. Incluso hoy hemos desarrollado nuevas habilidades como escribir en teclados de dimensiones reducidas, mediante teléfonos celulares o jugar a través de botones y palancas, como en caso de los juegos de video.

El presente trabajo ésta organizado de la siguiente manera: en la sección II se encuentra la descripción de los aspectos médicos para la realización del sistema de rehabilitación para la extremidad superior propuesto, posteriormente en la sección III puede ser consultada la metodología, la elección de los materiales, el diseño y la construcción del sistema, después de ello, en la sección IV se presentan los resultados obtenidos del sistema, además de futuras actualizaciones; posteriormente en la sección V se presentan las conclusiones y finalmente en la sección VI se presentan las referencias bibliográficas utilizadas.

II. CARACERISTICAS DE ESTUDIO DEL SISTEMA

Para el presente proyecto se colaboró con la fisioterapeuta Marita Nava Ruiz con número de cedula profesional 11275961, quien fue la figura de especialidad del área de la salud y fue quien fundamentó médicamento que el sistema de rehabilitación tenga una justificación médica, la descripción de las características necesarias del sistema desarrollado detallan a continuación.

- Tener dos o más grados de libertad.
- Hacer un modelado o diseño en 3D antes de su armado.
- Tener un sistema de visión artificial.
- Tener una base de datos.
- Contener señales mio-eléctricas.
- Hacer pruebas de resistencia.

Una vez claros los puntos a tomar en cuenta, fue necesario la consulta de la fisioterapeuta para que el diseño del sistema fuese acorde a las necesidades médicas de los pacientes, una condición importante de este tipo de sistemas es que es necesario que este tipo de sistemas sea portatil y de dimensiones que faciliten su instalación en cualquier sitio, esto último es para que el paciente, con indicaciones del fisioterapeuta, pueda tomar terapia diariamente en la comodidad de su hogar y sin necesidad de que se encuentre acompañando.

Para finalizar este apartado se inició un cronograma para la realización del proyecto. (Figura 1)

En el cronograma, segmentamos el trabajo en semanas, dándonos un tiempo de realización de 13 semanas, siendo la semana 1 el desarrollo teórico e investigación para el proyecto, la semana 2 hasta la semana 4 el desarrollo mecánico, pero igual teórico del sistema, la semana 5 empezando con la cotización de los materiales, el diseño en 3D de las piezas y la puesta en marcha para imprimirlas.

De la semana 6 a la semana 8 se establecieron diferentes actividades las cuales se propuso dividir el equipo por tareas, programación del HMI, programación de los motores y programación de los sensores mioelectricos fueron las 3 actividades para estas semanas.

En la recta final simplemente se propuso que desde la semana 9 hasta la semana 13 se hiciera el ensamblado, pruebas y mejoras del prototipo y las pruebas finales.

ISSN en trámite

ACTIVIDAD	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6	SEMANA 7	SEMANA 8	SEMANA 9	SEMANA 10	SEMANA 11	SEMANA 12	SEMANA 13
DESARROLLO DEL PROYECTO TEORICAMENTE													
DESARROLLO DEL MECANISMO													
COTIZACIÓN DE LOS MATERIALES													
IMPRESIÓN DE LAS PIEZAS													
PROGRAMACIÓN DE LA HMI													
PROOGRAMACIÓN DE LOS MOTORES													
PROGRAMACIÓN DE LAS SEÑALES MIOELECTRICAS													
ENSAMBLADO DEL PROTOTIPO													
PRUEBAS DEL PROTOTIPO													
PRUEBAS FINALES DEL PROTOTIPO CON LA HMI													

Fig. 1. Cronograma

III. METODOLOGÍA, ELECCIÓN DE MATERIALES, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REHABILITACIÓN.

La metodología se realizó basándonose en un gráfico que se muestra en la Figura 2 donde se describe de forma sencilla cada etapa del proyecto.



Fig. 2. Gráfico de la metodología.

Siguiendo con la metodología, se decidieron los materiales haciendo una investigación costo-beneficio y basándonos en el mercado en este ámbito.

Los instrumentos para la realización del sistema son:

Motores nema 17 (Figura 3) los cuales son de tipo a pasos con un bajo coste energético y con un peso de 300 gr., al ser motores a pasos cuenta con la ventaja de ser precisos en el arranque y paro, además, su durabilidad es amplia y además de ser motores de un consumo energético bajo. Aunado a esto, se decidió usar controladores (Figura 4) para la manipulación de los motores.



Fig. 3. Motor Nema 17.



Fig. 4. Controlador para motor.

Para la parte del procesamiento de señales del sistema se utilizó un microcontrolador de software libre (Figura 5), el dispositivo mencionado anteriormente presenta un costo asequible y fácil de operar. Una vez definido el microcontrolador se buscó y se propuso un módulo de señales mioelectricas, en este caso fueron sensores musculares electromiográficos (EMG), estos se pueden apreciar en la Figura 6.

ISSN en trámite



Fig. 5. Arduino UNO.



Fig. 6. Sensores EMG.

Para el armado del prototipo se eligieron materiales, para las piezas diseñadas en 3D, para ello, se utilizó PLA común (Figura 7) y se imprimieron en la impresora Ender 3 de Creality (Figura 8), además, para el armazón se planteó el aluminio en forma de soleras (Figura 9).



Fig. 7. PLA Común.



Fig. 8. Creality Ender 3.

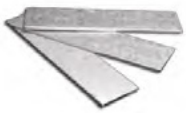


Fig. 9. Solera de aluminio.

Diseño

Se realizó el diseño de acuerdo a las necesidades del movimiento, esto es según sea la zona que requiera la rehabilitación del paciente. Se utilizó el software de diseño 3D Autodesk Fusión 360, (que cuenta con licencia gratuita para estudiantes) que permite el desarrollo de modelos a partir de las líneas de un plano técnico y el renderizado de imágenes mediante el cálculo de la comunicación aplicada a un modelo para su representación realista a través de la computadora. Se eligió esté programa por su practicidad al permitir generar Renders (Figura 10) y planos sin necesidad de instalar componentes externos, por ser gratuito y por su capacidad de exportar a archivo con extensión STL para su posterior impresión 3D.



Fig. 10. Render 3D del sistema en Fusión 360.

Programación

La programación se llevó a cabo en el software de National Instruments LabVIEW, este es capaz de integrar dos modalidades de uso del sistema, uno capaz de dar rehabilitación activa, apagando los motores y dejando al paciente que trabaje con la fuerza que el mismo ejerza y otra modalidad donde los motores actúan para una rehabilitación de forma pasivo-asistida, además de incluir instrumentos virtuales compuestos de programación propia para optimizar el rendimiento del HMI. Adicionalmente a la programación fue la inclusión de los sensores mioelectricos al HMI para graficar esos datos en la pantalla, todo lo anterior está conectado a la cámara para la implementación de visión artificial al sistema (Figuras 11 y 12).

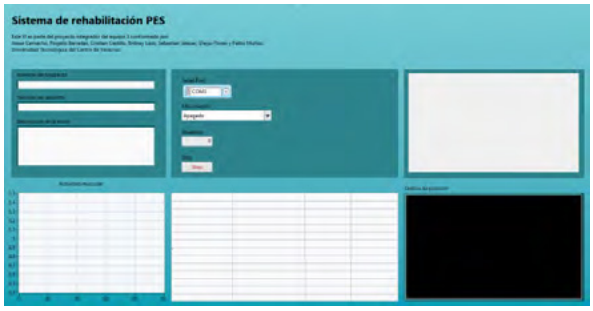


Fig. 11. Programación en NI LabVIEW.

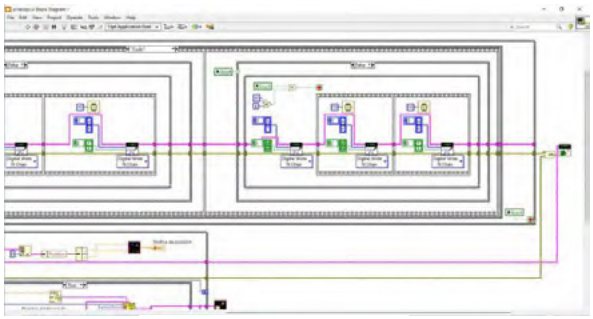


Fig. 12. HMI en NI LabVIEW.

Construcción

Para finalizar esta sección, sea aborda el armado del prototipo, una vez que ya se probó todo por separado, se procedió a materializar lo diseñado en 3D por software.

Para la parte energética, se decidió utilizar un transformador de 12 voltios y 2 amperios para cada motor, haciendo que el uso energético también sea portátil al solo ocupar dos conectores a la luz, además, al usar una placa Arduino UNO conectada al HMI, el uso energético de este se limita al ordenador que esté conectado.

ISSN en trámite

Las medidas del diseño CAD fueron materializadas físicamente para poder integrar adecuadamente el sistema, esto anterior es importante para el correcto ensamble mecánico del sistema, destacando que el sistema es móvil, ya sea por parte del usuario o por parte de los motores. Parte del proceso de ensamble se muestra en las Figuras 13 y 14.



Fig. 13. Emsamble del sistema.

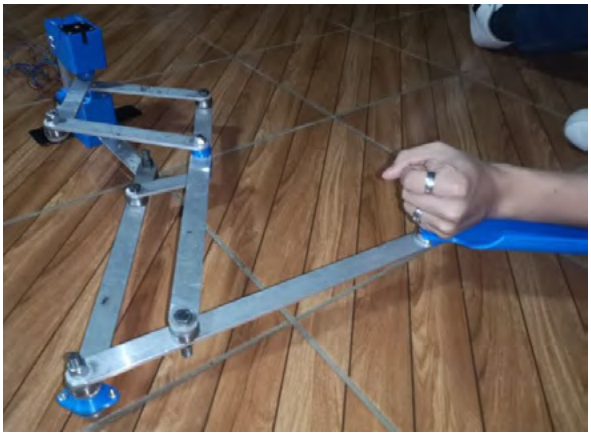


Fig. 14. Prototipo armado en pruebas.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS Y FUTURAS ACTUALIZACIONES.

Para dar inicio a esta sección, tendremos que dividirlo en partes, ya que este proyecto fue realizado en diferentes etapas. Dentro de las pruebas se comprobó que los sensores mandaban los datos correctamente para posteriormente ser graficados y almacenados en su base de datos, para futuras revisiones.

Dentro de la etapa de diseño, se pensó en los movimientos que realizará según las necesidades del paciente. Y se pensó en un sistema resistente y de fácil montaje, cumpliendo el objetivo de ser cómodo y fácil de usar para el paciente.

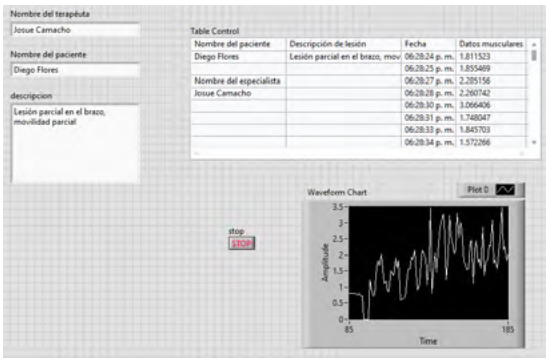


Fig. 15. Gráfica y datos del sistema aun en pruebas.

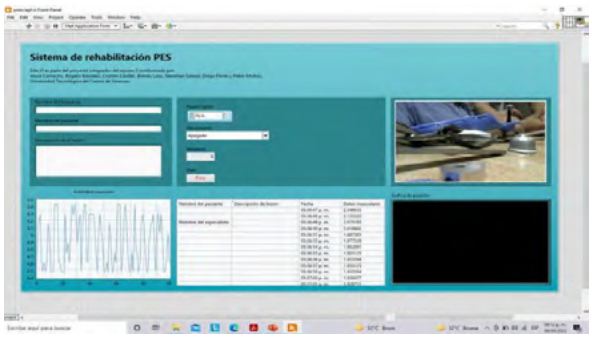


Fig. 16. Gráfica y datos del sistema.

En general, la Figura 16 se puede observar la gráfica de los sensores mioelectricos donde se muestra la actividad a la par que se van registrando en la base de datos del sistema, así como los datos generales de la consulta del fisioterapeuta.

Siendo más específicos, la Figura 16 muestra diferentes datos, tenemos un apartado dedicado a los datos que debe ingresar el especialista del área salud en cada consulta, estos datos al final de la sesión son añadidos a la base de datos para un seguimiento, datos necesarios como el nombre del especialista, la descripción del problema tratado, así como el nombre del paciente.

También a la par, cada segundo se va tomando muestras en valores numéricos decimales que dan los sensores electromiograficos y así poder graficarlos de forma visual en la gráfica de la parte inferior derecha, estos datos son referenciales para la fisioterapeuta para que ella visualice en que momento y en qué posición muestra más señales musculares el paciente.

En un futuro se piensa trabajar con estos valores para mejorar el sistema y ser más eficiente energéticamente.

Trabajo futuro

Para futuras actualizaciones se piensa en una nueva forma para usar el sistema, añadiendo a la programación una modalidad que use los registros mioelectricos para controlar la velocidad de los

ISSN en trámite

motores para que el paciente se esfuerce un poco para su rehabilitación y así pueda, además de rehabilitarse, ejercitarse, aunado a esto se piensa en un tercer motor con un tornillo sin fin que auxilie a los motores centrales para un movimiento más orgánico a la hora de la rehabilitación.

Otra adición a esto sería convertir ambos transformadores en uno solo para que pueda ser un sistema con una sola conexión a la luz, aprovechar espacio y ahorrar cables.

Y para finalizar se piensa en reemplazar el microcontrolador por una Raspberry Pi 4, para usar software libre en todo el prototipo y abaratar costos en licencias digitales, además de usar visión artificial basada en Python, usando la vanguardia en tecnología.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el sistema es eficaz y cumple su funcionamiento, podemos decir que el Mark I de este sistema es un éxito, cumplió con los requerimientos que pusimos al principio y a posteriori podremos desarrollar el Mark II y realizando rehabilitaciones, además de muchas pruebas se espera poder sacar al mercado la versión final de nuestro sistema llamado *PES*.

Este prototipo va dirigido para las personas que presenten una lesión en su extremidad superior, lo que se busca con este proyecto es facilitar la tarea de rehabilitación al sector salud, buscando que el paciente pueda tomar terapia diariamente en la comodidad de su hogar alcanzando el mismo progreso que en un centro especializado.

VI. REFERENCIAS

[1] Sotelano F., “Historia de la rehabilitación en Latinoamérica”, Departamento de Rehabilitación CEMIC (Centro de Educación Médica e Investigaciones Clínicas), marzo 2011.

[2] Acevedo Londoño J.A., Caicedo Bravo E., Castillo García J.F. “Aplicación de tecnologías de rehabilitación robótica en niños con lesión del miembro superior”. *Revista de la Universidad Industrial de Santander Salud*. Vol. 49(1), pp103-114, enero-marzo 2017.

[3] Barco Laakso R. y Antuña S., “Rigidez de codo postraumático”, *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, Vol. 54(2), pp. 126-135, marzo-abril 2010.

[4] Yang J., Peng Q., Zhang J. y Gu P. “Design of a Hand Rehabilitation Device Using integrated Axiomatic and Benchmarking Methods”, *6th CIRP Global Web Conference 6th CIRP Global Web Conference*, Vol. 78, pp. 295-300. 2018.

[5] Ahmed T., Thopalli K., Rikakis T., Turaga P., Kelliher A.,Huang y Wolf S., “Automated Movement Assessment in Stroke Rehabilitation”, Frontiers in Neurology, Vol. 12, pp. 1-2. 2021.

[6] Horcajada González D.R., “Miembro superior, osteología, miología y artrología. Proporciones y módulos”, *Facultad de bellas artes de san Fernando Universidad Complutense de Madrid*, TEMA 5, pp. 1-35, mayo 2017.

ISSN en trámite

Estudio paramétrico de un muro Trombe con un material de cambio de fase: efecto de los materiales de construcción.

J. P. Ibarra-Salazar*, E. Vázquez-Beltrán*, I. Hernández-López*, I. Zavala-Guillén**

**Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000 (e-mail: irving.hernandez@unison.mx).*

***Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, Carr. Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California, CP 22860.*

Resumen:

Este trabajo presenta el estudio teórico del efecto de los materiales de construcción de un sistema de muro Trombe con un material de cambio de fase (PCM-TW) sobre la energía suministrada a una edificación bajo las condiciones climáticas de Tacubaya, Ciudad de México. El sistema consiste en un muro compuesto por un material de cambio de fase ubicado entre dos losas de igual espesor que pueden ser de adobe o concreto. Con el propósito de determinar la configuración óptima, se realizó un análisis dinámico del sistema PCM-TW utilizando las configuraciones de Concreto-Adobe (C-A), Adobe-Concreto (A-C) y Concreto-Concreto (C-C). Se consideró la incorporación del sistema PCM-TW a una habitación con temperatura de confort térmico de 24 °C. Se utilizó el método de balances globales de energía (GE) para resolver la conducción de calor en el vidrio colector, y la convección y radiación en el canal de aire. Adicionalmente, se utilizó el método de volumen finito para la resolver la difusión térmica en el muro masivo con PCM. Los resultados mostraron que una configuración de Concreto-Adobe (C-A) proporcionó hasta 10% más energía durante el día, por lo cual es ideal para uso diurno. En el caso de uso nocturno, con un suministro de energía de hasta 12%, la configuración de Concreto-Concreto (C-C) resultó ser la mejor para uso nocturno.

Palabras clave: muro Trombe, PCM, arquitectura bioclimática, calefacción pasiva, evaluación dinámica.

1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones representan un sector importante en el ámbito energético a nivel mundial, de acuerdo con cifras reportadas por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en ingles), la producción de energía en 2019 se incrementó en un 2.82% con respecto al año anterior, donde las edificaciones representan alrededor del 22% del consumo energético a nivel mundial. IEA, (2021).

El informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción 2020, reporta que la operación y construcción de una edificación emite hasta un 38% de CO_2, donde alrededor del 28% de las emisiones corresponde al consumo de energía dentro de las edificaciones, United Nations Environment Programme, (2020). Casi una quinta parte del aumento de las emisiones de CO_2 en este sector, se debe al uso continuo de la energía eléctrica. Esto último es entendible ya que la energía eléctrica es el tipo de energía que se utiliza en sistemas de aire acondicionado y calefacción para el establecimiento de condiciones de confort térmico en edificaciones.

Considerando lo anterior, es primordial la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a mantener un confort térmico, a disminuir el consumo energético y así, minimizar su impacto ambiental. En este sentido, el sistema de muro Trombe (TW por sus siglas en inglés) es un sistema solar pasivo de ganancia indirecta que se utiliza con fines de calefacción y en ciertas ocasiones, para ventilación, (Morse, 1881).

Este sistema ha sido estudiado desde el siglo pasado principalmente en su configuración de calefacción. En el trabajo de Utzinger et al. (1980) desarrollaron un modelo unidimensional (1D) basado en el método de balances globales (GB) para determinar, los efectos del flujo de calor no uniforme (2D) a través del TW. Los autores concluyen que el modelo 1D con una variación exponencial de la temperatura brinda una excelente concordancia en comparación con un modelo 2D.

Hernández-López, (2016) realizó un estudio paramétrico bajo las condiciones de un clima clasificación Köppen Cwb de México. De acuerdo con el autor, el uso de concreto en el muro mejora desempeño térmico del TW. Además, cuando el ancho

ISSN en trámite

del canal y el espesor del muro son mayor o igual a 20 y 30 cm, respectivamente, no presenta mejoras significativas.

Por otro lado, Hernández-López et al. (2016) determinaron, el almacenamiento térmico para el día más frío y cálido en un clima Cwb con valores de 109 MJ y 70 MJ, respectivamente. Mientras que, las pérdidas a través del vidrio colector hacia el exterior fueron de 57.3 al 64.6%. En otras palabras, más de la mitad de la energía solar que se introduce al sistema se pierde en esta componente. Los autores señalan que la implementación de materiales convencionales en el sistema TW tiene una importante limitación en la capacidad almacenamiento térmico del muro. Así como un alto coeficiente de pérdidas por la pared semitransparente.

Por lo tanto, para mejorar el desempeño térmico del sistema TW diversos autores han incorporado materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en ingles), los cuales, son usados como medio de almacenamiento de energía térmica mediante el aprovechamiento del calor latente durante el cambio de fase. Es decir, absorben energía sensible del muro mientras se derriten y la liberan hacia él mientras se solidifican (Xiong et al. 2022).

Rabani et al. (2013) determinaron el uso de materiales de PCM como un muro almacenador el cual incrementa su capacidad de almacenamiento térmico lo que mantiene una mayor temperatura en la habitación y con ello, un mejor desempeño térmico del sistema sin la necesidad de emplear muros gruesos.

Por otro lado, Li et al. (2019) propusieron un nuevo diseño de muro almacenador integrado con una doble capa (exterior e interior) de PCM. El cual mejora el calentamiento en verano y reduce las fluctuaciones en invierno. Subsecuentemente, Liu et al. (2020) estudiaron los efectos de un componente aislante externo en el desempeño térmico del TW con PCM. Los autores observaron que, el confort térmico mejora significativamente durante la noche. Posteriormente, Duan et al. (2021) determinó, la relación óptima de la temperatura de fusión y el espesor de capa del PCM de 23ºC y 5 cm respectivamente.

Recientemente, 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.

Si bien en la literatura existen estudios publicados sobre el desempeño térmico de sistemas PCM-TW, hasta la fecha no se han reportado algunos parámetros que podrían optimizar su desempeño. Un parámetro importante por analizar es el material de construcción que rodea al PCM.

En este sentido, el propósito de este trabajo es el de estudiar el efecto que tiene el uso de dos distintos materiales en el almacenador sobre el desempeño de un PCM-TW. En el presente estudio se consideran dos materiales típicos: Adobe y Concreto. Estas configuraciones se evalúan bajo las condiciones climáticas de una ciudad mexicana con clima templado.

2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

La Figura 1 muestra el modelo físico del sistema PCM-TW. Éste está constituido por los siguientes elementos: 1) la pared del vidrio colector con espesor L_g; 2) el muro almacenador con PCM encapsulado por dos losas que pueden ser de adobe (A) o concreto (C), la primera con espesor L_1 y la segunda con L_2. El muro tiene una altura de H_w, un espesor en conjunto de L_w: el espesor de PCM de L_{PCM}, donde $L_w = L_1 + L_{PCM} + L_2$; 3) el canal de aire formado por el vidrio y el muro almacenador; 4) el canal con ancho de L_c. El sistema cuenta con ventilas en la parte superior e inferior que funcionan para establecer un lazo convectivo entre el canal y la habitación. Cada ventila tiene una longitud de apertura H_v igual al ancho del canal (H_v=L_c). El sistema tiene una profundidad W y una altura H. El sistema PCM-TW se considera orientado al sur con el fin de garantizar la mayor incidencia de radiación solar sobre el absorbedor durante el día

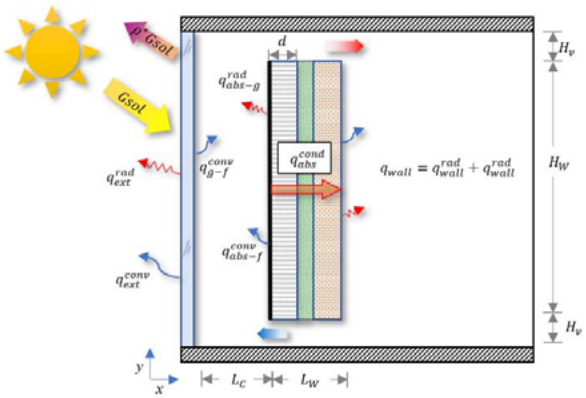


Fig. 1 Modelo físico del sistema PCM-TW.

Con el propósito de reducir la complejidad del modelo matemático, el sistema de muro Trombe se dividió en dos sistemas principales. El primero corresponde al conjunto vidrio-canal. En este conjunto ocurren tres mecanismos de transferencia de calor: conducción en el vidrio, convección en el aire y radiación térmica con las superficies que lo componen. Para resolver las ecuaciones gobernantes de dicho sistema se implementó el método de balances globales de energía (BG).

Por otro lado, el segundo sistema es el muro masivo con PCM. Aquí ocurre el fenómeno de difusión térmica y para su

ISSN en trámite

solución, se optó por emplear al método de volumen finito (MVF).

2.1 Modelo de balances globales de energía en el sistema vidrio-canal.

Para modelar la transferencia de calor en el sistema de vidrio-canal se decidió utilizar 5 nodos con la finalidad conocer lo que sucede en todo el sistema de muro Trombe-PCM.

La Figura 2 muestra la disposición de los puntos nodales en el sistema, 3 se colocaron en el vidrio ($T_{g,1}$, $T_{g,2}$, $T_{g,3}$), uno en el canal (T_f) y otro en la frontera del muro masivo. Este último con el fin de ser el nodo enlace que brinde la información necesaria para el acoplamiento con el otro sistema de muro-PCM.

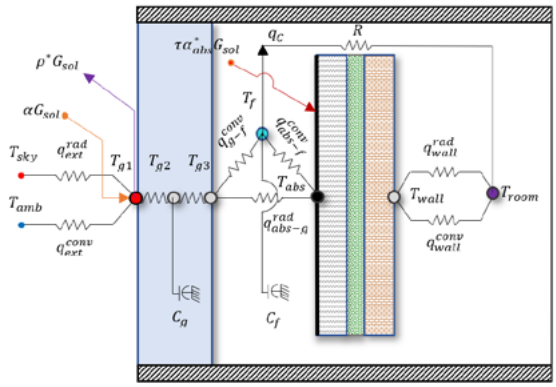


Fig. 2. Diagrama térmico resisitvo del sistema.

El modelo matemático de transferencia de calor conjugado en el sistema vidrio-canal se encuentra descrito por las Ecs. (1)-(5):

Nodo $T_{g,1}$:

$$\alpha_g^* G_{sol} = h_{ext}^{conv}\left[T_{g,1} - T_{amb}\right] + \varepsilon_g^* \sigma\left[T_{g,1}^4 - T_{sky}^4\right] + \lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} \quad (1)$$

Nodo $T_{g,2}$:

$$\lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} - \lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g / 2} = \rho_g C_{P,g} L_g \frac{dT_{g,2}}{dt} \quad (2)$$

Nodo $T_{g,3}$:

$$\lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g / 2} + \varepsilon_{g-abs}^* \sigma\left[T_{abs}^4 - T_{g,3}^4\right] = h_{g-f}^{conv}\left(T_{g,3} - T_f\right) \quad (3)$$

Nodo T_f:

$$h_{g-f}^{conv}\left(T_{g,3} - T_f\right) + h_{abs-f}^{conv}\left(T_{abs} - T_f\right) - q_C^* = \rho_f C_{P,f} L_c \frac{dT_f}{dt} \quad (4)$$

Nodo T_{abs}:

$$\alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} = \varepsilon^* \sigma\left[T_{abs}^4 - T_{g,3}^4\right] + h_{abs-f}^{conv}\left(T_{abs} - T_f\right) + q_{abs}^{cond} \quad (5)$$

Donde las condiciones iniciales para cada punto nodal son igual la temperatura del cuarto (T_{room}=24°C).

2.2 Modelo conductivo del muro almacenador.

En la Figura 3 se observa el sistema físico del muro con PCM el cual se trabajó bajo el método de volumen finito.

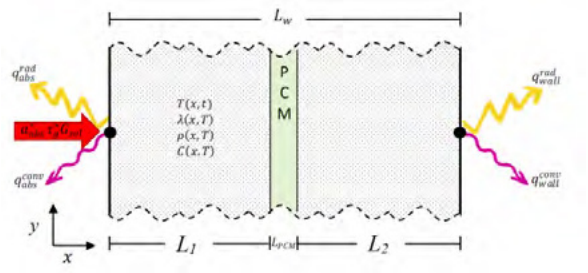


Fig. 3. Modelo físico del sistema muro masivo.

A continuación, se presenta el modelo matemático del sistema del muro almacenador con material de cambio de fase.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

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).

3. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Para el algoritmo de solución se resolvió el problema de referencia propuesto por Aparicio (2021). El Modelo físico de este problema se muestra en la Figura 4. Éste consiste en una losa compuesta por concreto y un PCM (PureTemp29). El PCM tiene un espesor de 0.01 m, se ubica entre dos secciones idénticas de concreto de 0.05 m de espesor. En la Frontera $x=0$ incide un flujo de calor q_s (750 W/m^2) y la Frontera $x=H_x$ se encuentra aislada.

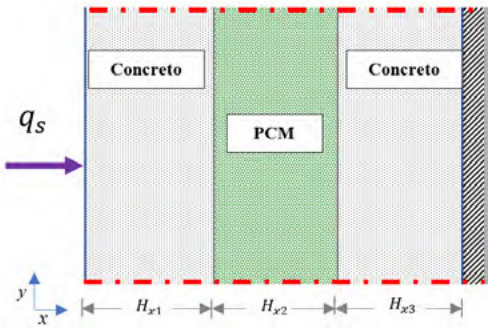


Fig. 4. Modelo físico de losa compuesta de concreto-PCM.

En la Tabla 1 se muestra la comparación de los valores de energía almacenada en los tres diferentes instantes de tiempo (una, dos y tres horas) a partir de un enfoque global y un enfoque diferencial. Se observa que la desviación máxima es de

ISSN en trámite

0.24 % al tiempo de 3 h. Esto permite aseverar que la metodología implementada resuelve de manera satisfactoria la difusión de calor en un sistema de losas con PCM.

Tabla 1. Energía almacenada (en MJ).

t (h)	ΔE_{sto}^{BG}	ΔE_{sto}^{dif}	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

Para validar el modelo conductivo en una losa de concreto, se reprodujeron los datos experimentales de Chagolla-Aranda et al. (2017). Estos datos corresponden a mediciones realizadas del 21 al 23 de noviembre de 2016 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. En la Figura 5 se presenta la temperatura de la superficie exterior del techo de concreto del dato experimental y la obtenida mediante el modelo matemático. Se encontró una diferencia máxima de 1.9 ºC, la cual corresponde al día 22 de noviembre.

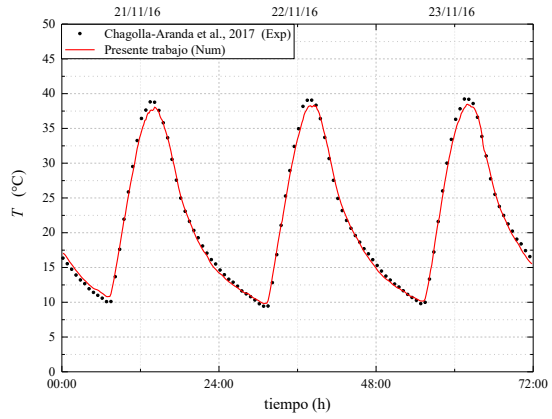


Fig. 5. Comparación de la Temperatura exterior de la losa de concreto.

Por otro lado, se observó que más del 90% de los valores calculados se acercan significativamente a las mediciones experimentales con una diferencia menor al 10% durante todo el período analizado. Así, se concluye que el modelo se ajusta a los datos experimentales de forma satisfactoria.

4. RESULTADOS

Para este estudio, se realizó un análisis dinámico PCM-TW sobre los materiales de construcción del muro: Adobe y Concreto. Con los materiales mencionados anteriormente, se decidió estudiar tres configuraciones diferentes para el muro. Estas son: concreto-concreto (C-C), concreto-adobe (C-A) y adobe-concreto (A-C). Teniendo en cuenta que el PCM se encuentra situado entre las losas de las distintas configuraciones. Con el propósito de realizar esta evaluación, se fijó a la configuración C-C como la referencia y se consideraron las condiciones climáticas del día más frío del año de la alcaldía de Tacubaya, Ciudad de México.

En la Figura 6 se muestran el flujo calor suministrado a la edificación (q_{int}) para las tres configuraciones del muro. Es importante mencionar que q_{int} es la suma del flujo de calor útil, (el cual es proporcionado por la convección en el canal, q_c) y del flujo de calor suministrado por a través del muro (q_{wall}). Se observa que para las 7:00 AM, en los tres casos, q_{int} encuentra debajo del cero, significando que el muro está extrayendo energía de la habitación.

Se muestra que aproximadamente entre las 10:00 AM y 15:00 PM, el comportamiento del flujo de calor interior para la configuración A-C, está mayormente influenciada por q_c, esto se debe principalmente a la difusividad térmica del adobe ya que, para éste, es más difícil conducir la energía a través de él, provocando que el calor proveniente del sol, caliente el aire dentro del canal, dificultando el almacenamiento de energía para el muro.

Por otro lado, se observa que para los Casos C-C y C-A (donde la primera losa es de concreto) permiten el paso de la energía con mayor facilidad. Esto se debe a que el concreto, al tener mejor conductividad térmica que el Adobe, conduce de mejor manera el calor.

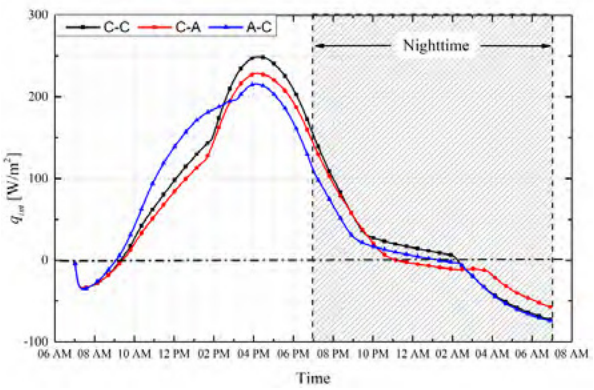


Fig. 6. Comportamiento de los flujos de calor hacia el interior de la habitación.

Conforme llega el periodo nocturno, se observa que para los Casos C-C y A-C (muros compuestos por una segunda losa de concreto) tienden a liberar más fácilmente la energía almacenada del muro hacia la habitación. Sin embargo, para el

ISSN en trámite

Caso C-A se nota como el flujo de calor no desciende de manera tan abrupta como en los otros dos casos, una vez más esto se debe a las propiedades termofísicas del adobe, que dificultan el paso de la energía.

En la Figura 7 se muestra la evolución de la fracción líquida media para todos los casos. Por medio de esta figura es posible observar si el PCM en el muro se funde en su totalidad (f_{ave} = 1.0) o no ($0.0 < f_{ave} < 1.0$). Se observa que, para los Casos C-C y C-A, el PCM empiezan a fundirse alrededor de las 10 AM. En cuanto al Caso A-C, el proceso de cambio de fase inicia alrededor de 20 minutos después. Esto se debe, una vez más, a que el adobe retarda al flujo de energía a través del muro y con ello, el incremento de temperatura del PCM.

La Configuración C-A es la primera en fundir por completo el material de cambio de fase desde la 13:30 PM y consigue mantenerse en fase líquida hasta las 10:30 PM, esto es gracias que el PCM está en función de los materiales que lo rodean, primeramente, se tiene una losa de concreto la cual permite con mayor facilidad el flujo de calor hacia el PCM.

Por otro lado, se tiene la losa de adobe la cual retiene mucho más a la energía, lo que provoca que ésta se almacene en el PCM. Para el Caso A-C, se observa que el material de cambio de fase tarda en fundirse poco más de una hora con respecto al Caso C-A.

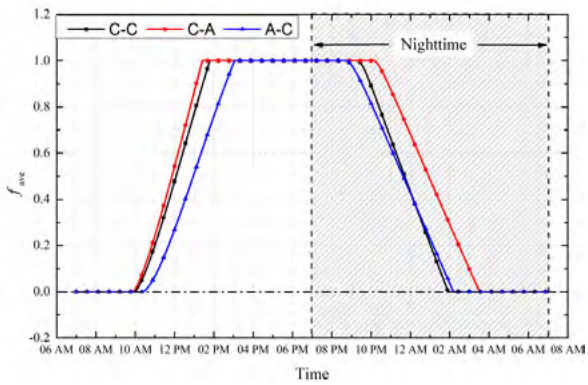


Fig. 7. Efecto del punto de fusión sobre la fracción liquida media.

Para el periodo nocturno se observa que la Configuración C-A es la que almacenó mayor energía por lo que tarda más en solidificarse, mientras que el Caso C-C fue el primero en solidificarse. Sin embargo, es secundado por el Caso A-C ya que fue este caso cuyo PCM permaneció en estado líquido por menor tiempo. Esto sugiere que el Caso A-C fue el que almacenó menor cantidad de energía.

La Tabla 2 muestra de manera cuantitativa la energía almacenada desde 7:00 AM hasta las 19:00 PM, es decir, durante las horas de exposición solar. También se presenta la energía suministrada a la edificación (E_{int}), la cual se divide en dos periodos: el diurno ($E_{int,d}$) y el nocturno ($E_{int,n}$), y la energía almacenada durante el día ($E_{sto,d}$).

Tabla 2. Energía almacenada y suministrada (en MJ/m^2).

Caso	$E_{sto,d}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$	E_{int}	t_{sp} [s]
C-C	4.50	5.11	0.31	5.42	7 hr 14 min
A-C	3.70	5.14	-0.15	4.99	6 hr 10 min
C-A	4.79	4.60	0.27	4.87	4 hr 09 min

En la Tabla 2 se comprueba que efectivamente el Caso A-C, con 3.70 MJ/m^2 fue el que retuvo menor cantidad de energía durante el día. Con 4.79 MJ/m^2, el Caso C-A fue la mejor configuración para almacenar calor ($E_{sto,d}$), apenas 6.44% más que el Caso C-C. Con relación a la energía suministrada en periodo diurno ($E_{int,d}$), los Casos A-C y C-C son los mejores; el primero con una superioridad menor al 0.6% con relación al segundo. Para la energía suministrada en periodo nocturno ($E_{int,n}$), el Caso C-C fue el mejor; 12% superior al Caso C-A. En cuanto al Caso A-C, éste presentó un valor negativo, lo cual indica que se presentó la extracción de energía de la edificación, situación que debe evitarse. Finalmente, con respecto a la energía total suministrada (E_{int}) y por el tiempo de suministro en periodo diurno ($t_{sp,}$), se aprecia que el muro con materiales C-C es el que presenta mejor desempeño.

5.CONCLUSIONES

Se analizó un PCM-TW con diferentes materiales bajo condiciones climáticas de la alcaldía de Tacubaya en la Ciudad de México. El comportamiento de este sistema se comparó con un PCM-TW con una configuración de concreto-concreto. Con base en los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- El caso C-A fue el que almacenó mayor energía durante el día, sin embargo, fue el que peor desempeño tuvo al momento de entregar energía al recinto.
- Para periodos diurnos, las Configuraciones A-C y C-C, con una diferencia menor al 0.6% fueron la mejores.
- Durante el periodo nocturno, la configuración C-C proporcionó 12% más energía a la habitación y hasta por dos horas más con relación a los otros dos casos.

Como conclusión general, se puede afirmar que el sistema de PCM-TW tiene la capacidad para ser implementado en Tacubaya en la Ciudad de México. Finalmente, antes de incorporar un PCM al sistema de TW, debe considerarse el

ISSN en trámite

uso que tendrá la edificación. Si la edificación es de uso diurno como un aula de clase, la configuración A-C es la opción más adecuada para calefacción pasiva. Por otro lado, si la edificación tendrá un uso nocturno como un dormitorio, la configuración C-C es la ideal. Si el sistema tendrá un uso mixto, la Configuración C-C es la idónea.

NOMENCLATURA

a	Radio del cilindro [m]
q_C^*	Flujo de calor útil normalizado [W/m^2]
G_{sol}	Radiación solar incidente
K	Razón de conductividad térmica
$N(\beta_m)$	Norma [m^2]
r	Coordenada radial [m]
R_{th}	Resistencia térmica de contacto [m^{2}K/W]
T	Temperatura [K]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m2K 4]
z	Coordenada axial [m]
Z	Espesor de losa [m]
β	Valor propio [m^{-1}]
ε*	Emitancia
λ	Conductividad térmica [W/mK]
$\boldsymbol{\alpha}^*$	Absortancia
ρ*	Reflectancia

REFERENCIAS

Aparicio, L.F. (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, Universidad de Sonora.

Chagolla-Aranda, M.A., Simá, E., Xamán, J., Álvarez G., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez E. (2017). Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 154, 232-243.

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.

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 de doctoral, Cenidet.

Hernández-López, I., Xamán, J., Chávez, Y., Alvarado-Juárez, R. (2016). Thermal energy storage and losses in a room-trombe wall system located in México. *Energy*, 109, 512-524.

INEGI (2020). Presentación de resultados, Estados Unidos Mexicanos. 9-13.

International Energy Agency. (2021). World Energy Balance.

Li S., Zhu N., Hu P., Lei F., Deng R. (2019). Numerical study on thermal performance of PCM Trombe Wall. Energy Procedia, 158, 2441-2447.

Liu Y., Hou L., Yang Y., Feng Y., Yang L., Gao Q. (2020). Effects of external insulation component on thermal performance of a Trombe wall with phase change materials. Solar Energy, 204, 115-133.

Morse, E.S. (1881). Warming and ventilating apartments by the suns' rays, U.S. Patent, 246-626.

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.

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.

SENER. (2019). Balance Nacional de Energía. 29-36.

Utzinger, D., Klein, S., Mitchell, J. (1980). The effect of air rate in collector-storage wall, *Solar Energy*, 25, 511-519.

Vázquez-Beltrán, E. (2019). Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro Trombe para condiciones climáticas de México. Tesis de Maestría CENIDET.

Xiong Q., Alshehri H. M., Monfaredi R., Tayebi T., Majdoub F., Hajjar A., Delpisheh M., Izadi M. (2022) Application of phase change material in improving trombe wall efficiency: An up-to-date and comprehensive overview. Energy and Buildings, 258, 111824.

Voller, V.R., Swaminathan, C.R. (1991). General source-based method for solidification phase-change, *Numerical Heat Transfer B,* 19, 175-189.

ISSN en trámite

Linear micro-displacement sensor based on Mach-Zehnder fiber-optic interferometer with sections of tapered and in a reflective configuration

Luis Guillen-Ruiz [*], **Jorge Luis Camas-Anzueto** [*], **Julio César Martínez-Morgan** [*], **Julio Alberto Guzmán-Rabasa** [*], **Gilberto Anzueto-Sánchez** [**], **Alejandro Martínez-Rios** [**]

[*] *Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez. Carretera Panamericana Km. 1080. C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (México).*

[**] *Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, C.P. 37150, León, Guanajuato (México).*

Corresponding author: imcguillen@live.com.mx

Abstract: We present spectral measurements of Mach-Zehnder fiber interferometer (MZFI) as a function of linear displacement in the order of micro-meters. The sensing element consists of a concatenated pair of tapers in a single-mode fiber optic. An interferometer placed in a reflective configuration (double-pass) allows higher contrast in the interference bands than the usual single-pass structure. Also, we use the spectrum differential integration (SDI) method to analyze the experimental data. Our experimental setup allows the comparison of the sensitivities by displacement of both configurations in a controlled laboratory environment, regardless of temperature or vibration. The system presented similar sensitivities in both designs, with the method tracking the wavelength shift, demonstrating that this method isn't convenient with the double-pass configuration. In contrast, using the SDI method with a double-pass configuration improves sensitivity by more than two times (4.7661 dBm/μm) compared with the single-pass configuration (2.3172 dBm/μm).

Keywords: Mach-Zehnder, linear displacement, fiber interferometer, reflective configuration, SDI method.

1. INTRODUCTION

The MZFI sensors have widely accepted because they are reliable, low cost, and relatively easy to manufacture. The principle of the MZFI is as follows: in the first transition taper, the fundamental core mode transfers energy to higher-order cladding modes, acquiring a phase difference in this region. The energy is back coupled in the second transition taper and interacts with the core mode.
Focusing exclusively on the online MZFI based on sections of two tapers separated by a distance L in single-mode fiber optics (SMF28) has been applied in the following sensors: Inclination (Zhao et al. (2017)), curvature (Gutiérrez et al. (2020)), temperature (Liao et al. (2019); Dong et al. (2020)), refractive index (RI) (Gong and Yam (2020)), strain (Ghasemi and Yam (2021)), magnetic field (Hernandez-Robles et al. (2017)) or a combination of multiple parameters (Aref (2017); Yang et al. (2020) Ghasemi and Yam (2022)).

An essential characteristic of a sensor is high sensitivity. Salceda-Delgado experimentally demonstrated that sensitivity in an MZFI manufactured with two tapers concatenated is a function of the distance between the tapers. (Salceda-Delgado (2015)). If the distance between tapers is considerably big, it represents a disadvantage because the sensor is more challenging to handle and pack; therefore, it is not helpful in applications with limited space.
A possible solution for MZFI sensors with a pair of tapers is to use a reflective configuration (Double-pass). This configuration allows more light for coupled into the higher-order cladding modes by exciting them through the light travel for a second time, without using long distances between tapers (Li et al. (2011)).
In this work, we proposed to improve the sensitivity of a single pass (SP) configuration of an MZFI by adding a circulator and splicing a beamsplitter coated fiber optic patch cable (BS) at the output of the interferome-

ISSN en trámite

ter. This configuration will be called double pass (DP). The MZFI configuration with DP was applied to the displacement sensor and interrogated with the tracking of the peak wavelength shift and differential spectrum integration (SDI) methods. Tracking the peak wavelength shift method showed quasi-equaled sensitivities between both configurations. In contrast, the SDI method showed double the sensitivity in the DP configuration to the SP configuration.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 MZFI principle

In Monzon-Hernandez et al. (2011) and Niu et al. (2014) shows the manufacture and the fundamental principle of an MZFI. The transmission function in SP configuration is given by:

$$I = I_{core} + I_{clad,i} + 2\sqrt{I_{core} I_{clad,i}} \cos \Phi. \tag{1}$$

where I_{core} and $I_{cladd,1}$ are the core and i-order cladding mode intensities, respectively, and Φ is the phase difference between the core and i-cladding modes.
The difference in Φ between the fundamental mode and a given one in the cladding mode propagating through an interferometer of length L as a function of wavelength and the difference in optical path length is:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad,i})L = \frac{2\pi \Delta n_{eff}^{i} L}{\lambda}. \tag{2}$$

Where n_{eff}^{core} and $n_{eff}^{clad,i}$ are the effective RIs of the core and i^{th}-order cladding modes, respectively, and Δ_{eff}^{i} is the effective difference between them, λ is the wavelength in the empty space and L represents the distance between the MZFI tapers.

Fig. 1 shows the operating principle from MZFI: When there is no cladding light in the section between tapers, there is no interference pattern, which is the case when the fiber tapers are straight. However, when the MZFI is bent, the symmetry is broken, enabling the coupling between the fundamental core and cladding modes, which propagate as a higher-order mode.
Also, in Fig. 1 (a) is shown the principal elements of the taper: waist diameter (WD), transition length (TL), and waist-length (WL).

2.2 Double pass configuration analysis

According to Li et al. (2011), the output of an SP two-beam MZI is:

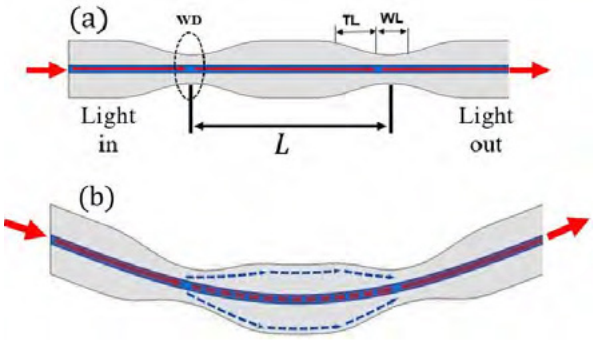


Fig. 1. Operating principle of MZFI. (a) Initial position; (b) MZFI bent due to linear displacement.

$$I_{output}(\lambda) = T_S(\lambda) I_{total}$$
$$T_{SP}(\lambda) = I_{core} + I_{clad,i} + 2\sqrt{I_{core} I_{clad,i}} \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff}^{i} L) \tag{3}$$

where $T_S(\lambda)$ is the transmission function, I_{total} is the total input light intensity. Δn_{eff}^{i}, I_{core} and $I_{clad,i}$ vary with wavelength. Therefore, the transmission function of an MZFI in double-pass configuration with a reflective element is expressed as follows:

$$T_{DP}(\lambda) = R_{BS} T_{SP}^{2} \tag{4}$$

Where R_{BS} is the reflexivity from beamsplitter coated fiber optic patch. Also, Li *et al.* define the peak contrast in a single-pass MZFI as:

$$I_{SP} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{I_{core}} + \sqrt{I_{clad,i}}}{\sqrt{I_{core}} - \sqrt{I_{clad,i}}} \right)^{2} \tag{5}$$

Therefore, for a DP configuration, the peak contrast should be, in theory, two times more than the SP configuration. However, we observed that the peak contrast was slightly greater than double. This discrepancy occurs due to the slight differences in shape between the two tapers. Although, the tapers have the same manufacturing conditions.

2.3 SDI method

The SDI method appeared in the year 2010 as a RI sensor (Li et al. (2010)), and has been used as RI sensor (Liu et al. (2017)), temperature sensor (Harris et al. (2010)), or both (Li et al. (2011); Wu et al. (2014)). The intensity measurement method generally uses the delimited area of an initial spectrum and the phase-shifted spectrum due to the measurement parameter (RI, temperature, etc.). It quantifies the variation in the optical power(seen Fig. 2). Li et al. (2010) widely explained the SDI method.

ISSN en trámite

We show the displacement sensitivity of the MZFI in the context of the SDI method. The transmission intensity at a certain wavelength is:

$$I = I_{core} + \sum_i I_{clad,i} + 2\sum_i \sqrt{I_{core} I_{clad,i}} \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}\left[n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad,i}(Disp)\right] L\right\} \quad (6)$$

Where *Disp* is the Displacement to be measured, also I_{core}, $I_{cladd,i}$ n_{eff}^{core} and $n_{eff}^{clad,i}$ depend of the wavelength. The equation 6 is derived to obtain the intensity sensitivity of the sensor in a given wavelength and is as follows:

$$\frac{dI}{d(Disp)} = \sum_i \sqrt{I_{core} I_{clad,i}} \sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda}\left[n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad,i}(Disp)\right] L\right\} \frac{4\pi}{\lambda} L \frac{dn_{eff}^{clad,i}(Disp)}{d(Disp)} \quad (7)$$

The absolute total power of the SDI is:

$$P_{SDI} = \sum_{\lambda_0}^{\lambda_0 + N\Delta\lambda} |I_{exam}(\lambda) - I_{base}(\lambda)| \frac{\Delta\lambda}{RBW}, \quad (I_{exam}(\lambda) - I_{base}(\lambda) = \frac{d(I)}{d(Disp)} \delta Disp) \quad (8)$$

Where N is the finite number of data points collected by Optical Spectrum Analyzer (OSA), $I_{exam}(\lambda)$ phase-shifted spectrum, $I_{base}(\lambda)$ initial spectrum, $\Delta\lambda$ is the wavelength step between neighboring data points and RBW is the OSA's resolution bandwidth.
To obtain the absolute power is pointwise subtraction of two spectrums, integrating the areas on the spam wavelength range. Therefore, we use computer software to integrate by numerical method.

The advantage of the SDI method is the absolute intensity differences between two spectra, each of which corresponds to a different measurement parameter, are integrated over a wide wavelength range. Compared to the tracking of the peak wavelength shift, it depends entirely on the shape of the peak. Also, if two spectra differ slightly from each other, the measurement of the peak wavelength shift is difficult to observe.

2.4 Experimental Setup

Fig. 3 shows a light source (1500-1600 nm) consisting of 3 m erbium-doped fiber (LIEKKI Er16-8 / 125) pumped

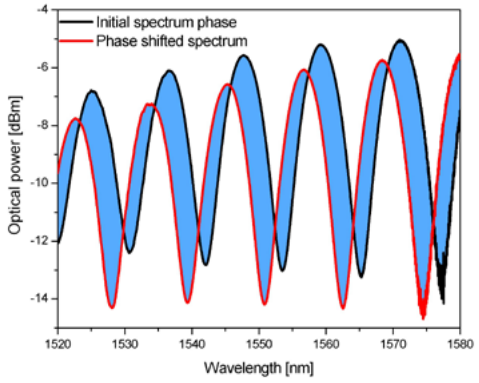


Fig. 2. Scheme of the principle of the SDI method

with a 980 nm laser diode (LD). The sensing part consists of an MZFI with L=5 cm. One end is attached to a fixed stage, and the other to a translation stage with a micrometer. We add a circulator, and the output from the MZFI is spliced to a beam splitter optical fiber to have a double-pass configuration. The OSA has a resolution of 0.05 nm and a 60 nm scan range, from 1520 nm to 1580 nm.
We use a controlled laboratory environment to develop tests with the experimental configuration for displacement, Therefore, temperature or vibration factors depreciate for simplicity in this testing phase.
The transmitted light beam propagates through the coated connector towards an OSA. Subsequently, the reflected light beam returns through the fiber optic and passes through the MZFI a second time, generating the DP configuration.

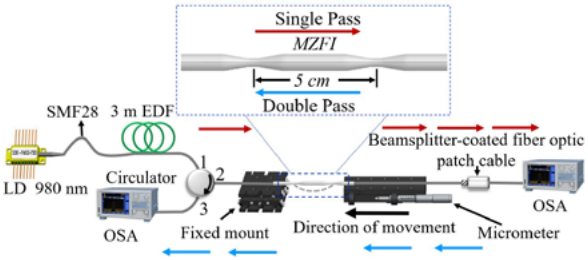


Fig. 3. Experimental setup of the MZFI in SP configuration (red arrows) and DP configuration (blue arrows)

3. RESULTS AND DISCUSSION

Linear displacement by a micrometer generates the spectral transmission response in a range of 500 µm to 600 µm with a resolution of 10 µm in an SP (see Fig. 4a) and DP (see Fig. 4b) configurations. The DP configuration allows a more pronounced spectrum than a single-pass configuration.

ISSN en trámite

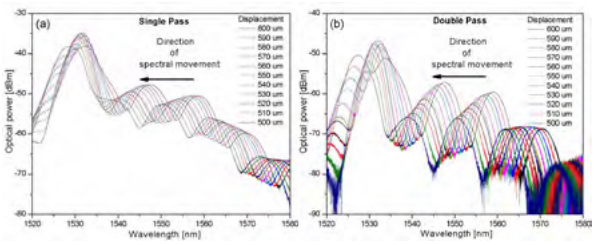


Fig. 4. Spectral transmission by linear displacement from 500 µm to 600 µm; (a) single pass; (b) double pass.

Fig. 5 (a) and (b) show the interference bands labeled from A to F for the analysis of peak wavelength shift. We observe noise in the DP configuration at peak A (1565 nm to 1580 nm). Due to the excitation of the modes by the bending of the optical fiber. Therefore, the peak shape is not precisely known, and determining the peak wavelength can't be reliably by peak fitting.

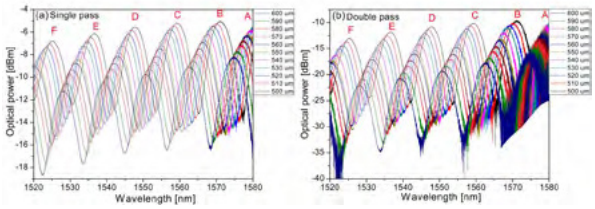


Fig. 5. Interference bands; (a) Single Pass configuration; (b) Double Pass configuration

The peak profiles from both configurations were plotted and shown in Fig. 6 (a). The SDI method used 1520 nm to 1580 nm, and we used the software from MATLAB trapezoidal numerical integration. Fig. 6 (b) shows the results obtain.
It is evident visually that the slopes of both configurations are similar because the DP configuration does not increase the wavelength shift of the attenuation peak; therefore, the peak wavelength shift of the SP and DP sensors are nearly identical. Another reason is that the big peak contrast generated by DP configuration increases the enclosed area between two relatively close spectra. It is worth mentioning that only using the SDI method improves the sensitivity in DP configuration.

Considering all sensitivities of the peak wavelength shift method (see table 1) (A-F) of both configurations, the standard deviation was σ=0.0002850 nm/µm. This small value indicates that this method is not convenient with the DP configuration. By contrast, the SDI method obtained better results because it doubled the sensitivity of the DP configuration concerning the SP configuration.

4. CONCLUSIONS

Generally, the method for analyzing the data contributes to a robust and accurate sensor. In this work, we studied

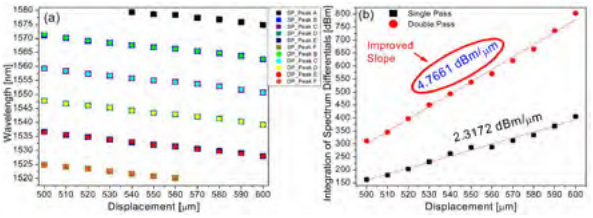


Fig. 6. Slopes; (a) Peak wavelength shift labeled from A to F with SP represented by square symbols and DP is illustrated by circle symbols, (b)Integration of the absolute spectrum differences.

Table 1. Comparison of sensitivities of system

	Peak Wavelength shift		SDI	
	Single Pass	Double Pass	Single Pass	Double Pass
Peak A	-0.08117 nm/μm	-		
Peak B	-0.08133 nm/μm	-0.08186 nm/μm		
Peak C	-0.08175 nm/μm	-0.08165 nm/μm	2.3170 dBm/μm	4.7661 dBm/μm
Peak D	-0.08197 nm/μm	-0.0814 nm/μm		
Peak E	-0.08179 nm/μm	-0.08105 nm/μm		
Peak F	-0.08125 nm/μm	-0.08150 nm/μm		

two methods. But, we can find the following: The Differential White Light Interferometry (DWLI) technique as a phase read-out system (Aref (2017)), analysis of the phase variation of the selected dominant mode with the Fast Fourier Transform (FFT) Zhao et al. (2019)), and the coupled-mode theory (CMT) (Ghasemi and Yam (2021)). Although these methods offer more robustness and precision, they are complicated and require a date extra processing concerning the two studied in this work. For this reason, we describe the following conclusions:

We improve the sensitivity of an MZFI using the double-pass configuration interrogated by the SDI method. The achieve improvement because the DP configuration increases the contrast of the interference bands, generating a larger enclosed area, which is a valuable parameter in the SDI method. Compared to the traditional tracking of peak wavelength shift in the single-pass configuration, our proposal offers a higher sensitivity (an improvement from 2.3172 dBm/μm to 4.7661 dBm/μm). Also, it can be helpful in the data analysis, increasing the sensor sensitivity without reducing accuracy.
Experimental data demonstrate that PD configuration using SDI method interrogation considerably improves the sensitivity of sensors using IFMZ. This improvement could apply to other sensors such as curvature, pressure, or refractive index to estimate the response and compare the results with the linear displacement sensor. It is required to examine if the system shows cross-sensitivity with temperature with the intention of the sensor being

ISSN en trámite

helpful in structural elements and verify the operation under environmental circumstances.

REFERENCES

Aref, S.H. (2017). Physical measurement with in-line fiber mach-zehnder interferometer using differential phase white light interferometry. *Optical Fiber Technology*, 38, 98–103.

Dong, J., Sang, M., Wang, S., Xu, T., Wang, Y., and Liu, T. (2020). A novel mach–zehnder interferometric temperature sensor based on a symmetrical double-grooved structure. *IEEE Sensors Journal*, 20(24), 14850–14856.

Ghasemi, P. and Yam, S.S.H. (2021). Single wavelength strain sensing based on double taper mach-zehnder interferometer. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(6), 1–7.

Ghasemi, P. and Yam, S.S.H. (2022). Tension and torsion sensing with a double-taper mach-zehnder interferometer. *Journal of Lightwave Technology*, 40(4), 1224–1230.

Gong, X. and Yam, S.S.H. (2020). Practical interrogation scheme for the abrupt taper mach–zehnder interferometer refractive index sensor. *Applied Optics*, 59(29), 9243–9247.

Gutiérrez, J.G., Sierra-Hernández, J., Vargas-Treviño, M., López-Apreza, E., Romero-Salazar, C., Hernández-Flores, O., Estudillo-Ayala, J., and Rojas-Laguna, R. (2020). A curvature sensing setup based on an asymmetric concatenated tapered mach-zehnder interferometer. *Optics & Laser Technology*, 132, 106490.

Harris, E., Li, Y., Chen, L., and Bao, X. (2010). Fiber-optic mach–zehnder interferometer as a high-precision temperature sensor: effects of temperature fluctuations on surface biosensing. *Applied optics*, 49(29), 5682–5685.

Hernandez-Robles, E., Estudillo-Ayala, J., Sierra-Hernandez, J., Jauregui-Vazquez, D., Hernandez-Garcia, J., Rojas-Laguna, R., and Martinez-Angulo, J. (2017). A dual tapered mach-zehnder interferometer for magnetic field sensing. In *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XI*, volume 10382, 137–145. SPIE.

Li, Y., Chen, L., Harris, E., Bao, X., and Bock, W.J. (2011). Refractive index and temperature sensor based on double-pass in-line mach-zehnder interferometer. In *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*, volume 7753, 77530Q. International Society for Optics and Photonics.

Li, Y., Harris, E., Chen, L., and Bao, X. (2010). Application of spectrum differential integration method in an in-line fiber mach-zehnder refractive index sensor. *Optics Express*, 18(8), 8135–8143.

Liao, Y.C., Liu, B., Liu, J., Wan, S.P., He, X.D., Yuan, J., Fan, X., and Wu, Q. (2019). High temperature (up to 950 c) sensor based on micro taper in-line fiber mach–zehnder interferometer. *Applied Sciences*, 9(12), 2394.

Liu, X., Jiang, M., Sui, Q., Geng, X., and Song, F. (2017). Hcpcf-based in-line fiber fabry-perot refractometer and high sensitivity signal processing method. *Photonic Sensors*, 7(4), 336–344.

Monzon-Hernandez, D., Martinez-Rios, A., Torres-Gomez, I., and Salceda-Delgado, G. (2011). Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers. *Optics letters*, 36(22), 4380–4382.

Niu, L., Zhao, C.L., Gong, H., Li, Y., and Jin, S. (2014). Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber. *Optics Communications*, 333, 11–15.

Salceda-Delgado, G. (2015). Optical fiber devices based on modal interference for sensing applications.

Wu, D., Huang, W., Wang, G.Y., Fu, J.Y., and Chen, Y.Y. (2014). In-line fiber fabry–perot refractive index tip sensor based on photonic crystal fiber and spectrum differential integration method. *Optics Communications*, 313, 270–275.

Yang, W., Pan, R., Yu, X., Fan, J., Xiong, Y., and Wu, M. (2020). A high sensitivity asymmetric double tapered fiber interference sensor. *Optik*, 210, 164495.

Zhao, C.L., Wang, R., Zhou, Y., Niu, L., and Gong, H. (2017). Angle sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber. *Optik*, 132, 236–242.

Zhao, L., Liu, B., Wu, Y., Mao, Y., Sun, T., Zhao, D., Liu, Y., and Liu, S. (2019). Photonic crystal all-fiber mach-zehnder interferometer sensor based on phase demodulation. *Optical Fiber Technology*, 53, 102059.

ISSN en trámite

Efecto del Tamaño del Cultivo Sobre la Distribución de Temperaturas en un Invernadero por Efecto de los Sistemas de Calefacción

C. E. Aguilar-Rodríguez*. O. E. Aguilar-Rodríguez*.
J. Flores-Velázquez. J. A. Ramos-Banderas***. C. A. Hernández-Bocanegra***. E. D. Mattos-Villaroel******

*Tecnológico Nacional de México/ITS de los Reyes, Carretera Los Reyes-Jacona, Col. Libertad, Los Reyes de Salgado 60300, Michoacán, México (ernesto.ar@losreyes.tecnm.mx)
*Tecnológico Nacional de México/ITS de los Reyes, Carretera Los Reyes-Jacona, Col. Libertad, Los Reyes de Salgado 60300, Michoacán, México (oscar.ar@losreyes.tecnm.mx)
**Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco Km 36.5, Texcoco 56230, Estado de México, México (jorgelv@colpos.mx)
*** TecNM/I. T. Morelia, Tecnológico 1500 Av., Morelia, Michoacán, 58120 México (jose.rb@morelia.tecnm.mx)
*** TecNM/I. T. Morelia, Tecnológico 1500 Av., Morelia, Michoacán, 58120 México (constantin.hb@morelia.tecnm.mx)
**** Universidad Autónoma de Zacatecas, Jardín Juárez, Col. Centro, C.P. 98000, Zacatecas, Zacatecas, México. (e_mattos_@outlook.com)

Abstract: El objetivo de este trabajo es evaluar dos sistemas de control climático para mantener los requisitos ambientales en el invernadero, mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). La predicción de temperaturas se realizó mediante un modelo numérico basado en CFD, evaluando dos sistemas emergentes de control climático que proporcionan una temperatura de 30 °C. Se estimo el efecto que tiene cada sistema sobre el ambiente del invernadero y cómo influye el tamaño del cultivo sobre la temperatura y su homogenización. Los resultados muestran que cuando se utiliza un sistema aéreo como los calefactores eléctricos, la temperatura a 1.5 m del suelo es mayor en el escenario simulado sin cultivo. Entre mayor sea el tamaño del cultivo, la temperatura a 1.5 m del suelo disminuye (gradiente de hasta 8 °C entre el escenario sin cultivo y con cultivo de 2 m), concluyendo que el cultivo al ser considerado un medio poroso funciona como una barrera reduciendo el intercambio de energía entre la parte más alta del invernadero y la zona del cultivo.

Keywords: CFD, confort térmico, tomate, gradiente térmico, modelo experimental.

1. INTRODUCTION

Durante las noches y días fríos de verano, la calefacción de los invernaderos tiene un efecto significativo en la calidad de los cultivos. Mantener una temperatura ideal en el área del dosel del cultivo (Ferentinos et al., 2017) requiere de grandes cantidades de energía, siendo la mayoría suministrada por combustibles fósiles, lo que puede representar un costo excesivo, por tal motivo, es necesario buscar alternativas más económicas (Chinese, Meneghetti, & Nardin, 2005; Aguilar-Rodríguez et al., 2020). Debido al aumento de los precios, la utilización de combustibles fósiles es cada vez más caro. Sin embargo, es necesario su uso al menos como fuente de calefacción auxiliar, teniendo en cuenta la posibilidad de la muerte de las plantas en caso de poca eficiencia energética (Ozgener & Hepbasli, 2005a). Algunos agricultores utilizan fuentes de energía renovables como las bombas de calor, sistemas de calefacción geotérmica, almacenamientos de lecho rocoso, almacenamiento de material de cambio de fase y almacenamiento de agua (Ozgener & Hepbasli, 2005b; Sethi & Sharma, 2008). No obstante, la mayoría de ellos son una solución específica para cada lugar en comparación con los sistemas basados en energía solar y la utilización de combustibles fósiles (Ahamed, Guo & Tanino, 2018; Yatarkalkmaz & Özdemir, 2019).

El avance tecnológico ha obligado a los productores a buscar nuevas soluciones en la construcción y equipamiento de los invernaderos para obtener cosechas de calidad en condiciones óptimas de crecimiento (Gaziński, 2005; Ertop & Atilgan, 2017). La demanda de energía del invernadero depende de las variaciones de temperatura entre el día y la noche, principalmente en invierno. Cualquier cambio en la intensidad de radiación solar provoca un cambio inmediato en la demanda de potencia requerida por los equipos de calefacción auxiliar (Rutkowski & Wojciech, 2009; Atilgan et al., 2017). Un sistema de calefacción eficiente debe mantener temperaturas adecuadas para el cultivo dentro del invernadero, garantizando un movimiento de aire en la zona de vegetación y una respuesta rápida a los cambios repentinos de temperaturas. Para cumplir estos requisitos, es necesario estudiar la eficiencia de los calefactores ante los cambios de temperatura y su posición (Aguilar-Rodríguez et al., 2020).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

ISSN en trámite

2.1 Descripción del sitio experimental

El análisis propuesto en la investigación se llevó a cabo en un invernadero cenital con tres naves cubiertas de polietileno translucido en el suelo y costados, policarbonato en el techo y malla anti-insectos en las ventanas. El prototipo del invernadero está ubicado en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo en el Estado de México (19°27'45.5" N, 98°54'12.2" W) a 2239 msnm, orientado de norte a sur en una llanura, sin estructuras a su alrededor. Durante el invierno en la zona, las temperaturas mínimas mensuales en el año llegar a ser de 2.49 °C.
El invernadero experimental tiene un área de 1 050 m^2. Las áreas de ventilación son manejadas en base al criterio del responsable del invernadero. Por lo general durante el invierno las ventanas se abren durante las primeras horas de la mañana, y se cierran manualmente en la tarde para encender el calefactor eléctrico (CM-VAX, Calelec, MTY, MX), que está situado a 3 m sobre el nivel del suelo en la nave 2 en la zona de barlovento y tiene una potencia de 15 kW.
Al interior del invernadero se instalo un sistema Eddy covarianza a 2.4 m de distancia de barlovento, siete sensores de temperatura (DS18B20, Maxim Integrated, San Jose, CA, USA) y tres sensores de humedad (DHT22, Zhengxinyuan Electronics Co., Ltd., Shenzhen, Chin) distribuidos en las tres naves a una altura de 3 m (Figura 1). Con un registro y almacenamiento de datos cada 5 s para temperatura y humedad, y cada 100 ms para el anemómetro. El periodo de monitoreo fue durante febrero del 2019, tiempo suficiente para evaluar el calefactor emergente. Al exterior del invernadero se tenía una estación meteorológica (Vantage Pro2 Plus, Davis Instruments, Hayward CA), utilizada para el registro de datos de temperatura, humedad, dirección, radiación y velocidad del viento, valores que fueron utilizados como condición inicial de frontera del modelo computacional.

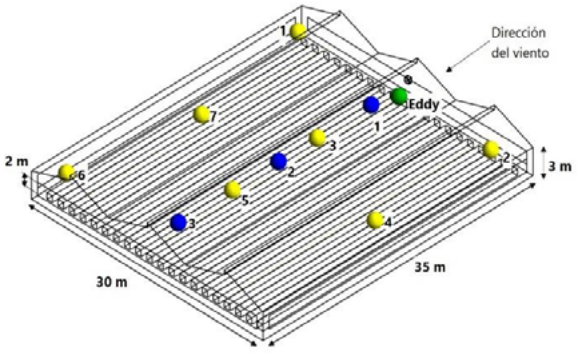


Figura 1. Diagrama geométrico de la sección transversal del invernadero estudiado.

2.2 Modelo computacional

La construcción geométrica del invernadero se realizó *ANSYS ® Workbench* utilizando la herramienta SpaceClaim. La malla del dominio del modelo se construyó en *Meshing*. Se determino las dimensiones del dominio computacional estableciendo como referencia la altura máxima de la estructura (H), con una altura mínima de 8H y una distancia entre barlovento y sotavento de 21H. Las dimensiones se establecieron siguiendo lineamientos dados en algunos estudios de ventilación natural en invernaderos permitiendo que el flujo de fluidos se desarrolle adecuadamente y disminuyendo los errores asociados a la capa limite atmosférica (Villagran, Romero & Bojaca, 2019). La malla cuenta con elementos estructurados con una calidad ortogonal de 0.98 y una distorsión de $1.935 \times 10^{-0.02}$. Para mejorar la calidad del modelo y los resultados se realizó un análisis de sensibilidad de malla tal y como lo muestra (Aguilar-Rodriguez *et al.,* 2020*)*. Las propiedades físicas, térmicas y ópticas de los materiales del invernadero y suelo, utilizadas en el modelo computacional se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales de cubierta.

Material	ρ (kg m^{-3})	CP (J kg^{-3} $^{\circ}C^{-1}$)	k (W m^{-1} $^{\circ}C^{-1}$)	Espesor (mm)
Suelo	1300	800	1	
Pared y suelo (Polietileno PE)	925.5	1900	0.3	0.18
Techo (Policarbonato PC)	1200	1200	0.19	6

2.3 Evaluación del modelo

La evaluación del modelo computacional con calefactor se llevó a cabo estadísticamente evaluando los valores de temperatura y velocidad del viento, simulados y registrados por los sensores mediante un ANOVA con un nivel de significancia del 0.05, tal y como se observa en Aguilar-Rodríguez et al., (2020).

2.4 Escenarios de simulación

El análisis ambiental se realizó comparando el efecto que tiene el crecimiento del cultivo de tomate en el invernadero sobre la distribución de temperatura, al utilizar dos sistemas de calefacción: 1.- Tuberías y 2.- Calefactor eléctrico (Tabla 2). El suministro de calor proporcionado por los equipos de calefacción fue constante para ambos escenarios (30 °C), las condiciones de frontera de los modelos computacionales utilizadas en ambos escenarios fueron las utilizadas por Aguilar-Rodríguez *et al.,* (2020). El funcionamiento del sistema de calefacción por tuberías estuvo basado en lo descrito por Flores-Velázquez, Villareal-Guerrero, Rojano-Aguilar & Schdmith, (2019).

Tabla 2. Escenarios de simulación.

Escenario	Tipo de calefacción	Cultivo

ISSN en trámite

a	Calefactor	Sin
b	Calefactor	1 m
c	Calefactor	2 m
d	Tubería	Sin
e	Tubería	1 m
f	Tubería	2 m

3. RESULTADOS

3.1 Validación del modelo computacional

La evaluación del modelo computacional con calefactor se realizó mediante el análisis ANOVA con un nivel de significancia 0.05, los resultados mostraron que, para la temperatura y velocidad del viento, el nivel de significancia fue menor que el valor p (0.05 > 0.56; 0.05 > 0.95), demostrando que no existen diferencias significativas entre las variables medidas y simuladas.

3.2 Análisis de los resultados de los escenarios simulados

El análisis de temperatura de los escenarios a, b y c en un plano transversal a 1.5 m de altura muestran que el tamaño del cultivo tiene un papel importante en la distribución de temperatura. En el escenario a, la temperatura simulada alcanza valores de hasta 25.85 °C en gran parte del invernadero, pero en las zonas cercanas a las paredes, la temperatura es de 23.70 °C, esta diferencia es ocasionada por la diferencia de temperaturas entre el aire exterior e interior (convección y conducción). El escenario b muestra que cuando se tiene al interior del invernadero un cultivo de tomate con 1 m de altura, la temperatura disminuye (7 °C) en comparación del escenario a, alcanzando temperaturas de hasta 19.85 °C en gran parte del invernadero. Para el escenario c, la temperatura simulada fue la menor de los tres escenarios con valores de 17.35 °C, lo que implica que, al ir creciendo el cultivo en el invernadero, la distribución de temperatura cambia, ocasionando una disminución de la temperatura cuando se utilizan sistemas de calefacción eléctricos (Figura 2).

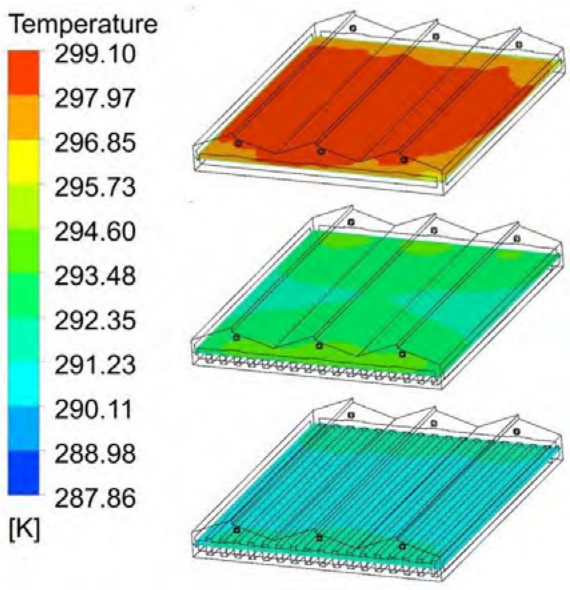


Figura 2. Análisis de temperatura (K) a 1.5 m del suelo en los escenarios a, b y c.

Para el escenario d, e, y f (Figura 3), la diferencia de temperatura a 1.5 m del suelo es de hasta 1.36 °C con las temperaturas más bajas en el escenario sin cultivo (13.62 °C). En estos escenarios, el transporte de energía a comparación de los escenarios a, b y c, es desde el suelo del invernadero por lo que las temperaturas más altas se presentan en la zona cercana al cultivo y suelo del invernadero. El movimiento de aire ocurre dado la diferencia de densidades entre el aire cercano al suelo (Generado por la tuberías) y el aire en la parte más alta del invernadero (Convección). Así mismo, se muestra en el escenario e y f, que, al crecer el cultivo, existe un incrementa de temperatura (0.3 °C) a 1.5 m del suelo. El análisis a 1.5 m del suelo muestra que para el escenario e y f la diferencia térmica no es tan representativa (0.3 °C), con un leve aumento de temperatura en el escenario f (cultivo a 2 m). El aumento de temperatura en los escenarios simulados es derivado de la obstaculización del cultivo (medio porosos), disminuyendo la transferencia de calor entre la tubería y la parte más alta del invernadero debido al aumento en la transferencia de cantidades transportadas (momento) y a la ley de Darcy.

ISSN en trámite

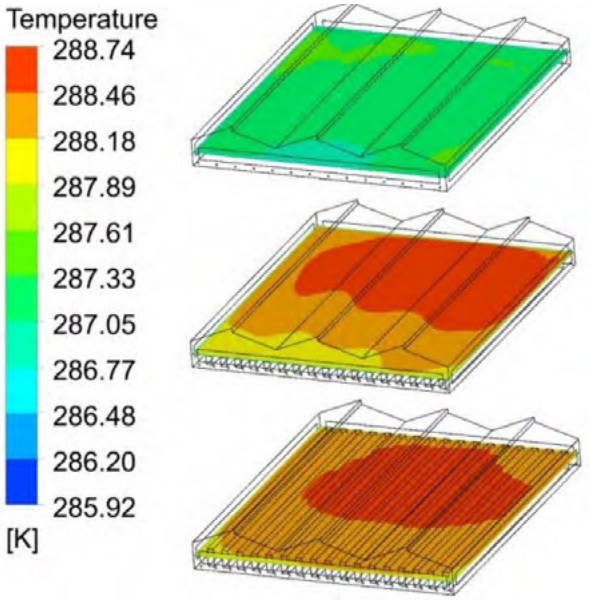


Figura 3. Análisis de temperatura (K) a 1.5 m del suelo en los escenarios d, e y f.

4. CONCLUSION

En los escenarios con calefacción eléctrica, al aumentar el crecimiento del cultivo, mejora la homogenización térmica a 1.5 m del suelo y disminuye la temperatura, no obstante, en los escenarios con cultivo de tamaño de 1.5 y 2 m esta diferencia es despreciable al ser menor de 1.7 °C. En cambio, en los escenarios con calefacción por medio de tubería, al incrementarse el tamaño del cultivo, la temperatura aumenta y existe una mejora en la homogenización de térmica del invernadero, la cual se reduce en 0.3 °C en los escenarios con un tamaño de cultivo de 1.5 y 2 m.

REFERENCIAS

Aguilar-Rodríguez, C.E., Flores-Velázquez, J., Ojeda-Bustamante, W., Rojano, F. and Iñiguez-Covarrubias, M. (2020). Valuation of the Energy Performance of a Greenhouse with an Electric Heater Using Numerical Simulations. *Processes.* Vol. 8. no. 5.

Chinese, D., Meneghetti, A. and Nardin, G. (2005). Waste-to-energy based greenhouse heating: exploring viability conditions through optimisation models. *Renew Energy.* Vol. 30. no. 10. p. 1573–86.

Ozgener, O. and Hepbasli, A. (2005a). Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study. *Build Environ*. Vol. 40. no. 8. p. 1040–50.

Ozgener, o. and Hepbasli, A. (2005b). Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system". *Energy Build.* Vol. 37. no. 1. p. 101–10.

Sethi, V.P. and Sharma, S.K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*. Vol. 82. no. 9. p. 832–59.

Gaziński, B. (2005) Technika klimatyzacyjna dla praktyków. Komfort cieplny, zasady obliczeń I urządzenia. Systherm, Poznań.

Rutkowski, K. and Wojciech, J. (2009). Reakcja istniejących systemów grzewczych w szklarni na zmieniające się warunki zewnętrzne. *Inżynieria Rolnicza.* Vol. 8. no. 117. p. 167–173.

Atilgan, A., Yucel, A., Tanriverdi, C., Oz, H. and Tezcan, A. (2017). Determination of optimum heating and cooling degree-hour values for pepper plant". *Infrastruct. Ecol. Rural Areas.* p. 457–467.

Ahamed, S.M., Guo, H. and Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering.* Vol. 178. p. 9-33.

Yatarkalkmaz, M.M. and Özdemir, M.B. (2019). The calculation of greenhouse gas emissions of a family and projections for emission reduction. *Journal of Energy Systems.* Vol. 3 no. 3. p. 96-110.

Ferentinos, K.P., Katsoulas, N., Tzounis, A., Bartzanas, T. and Kittas, C. (2017). Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment. *Biosyst. Eng*. Vol. 153. p. 70-81.

Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Rojano-Aguilar, A. and Schdmith, U. (2019). CFD to analyze energy exchange by convection in a closed greenhouse with a pipe heating system. *Acta universitaria.* Vol. *29*.

Villagrán, E.A., Romero, E.J.B. and Bojacá, C.R. (2019). Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosyst. Eng.* Vol. 188. p. 288–304.

Montaño-Moreno, J.J., Palmer-Pol, A., Sesé-Abad, A. and Cajal Blasco, B. (2013). Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema.* Vol. 25. no. 4.

ISSN en trámite

Diseño mejorado de una batería de flujo tipo redox de pequeña escala para el almacenamiento de energía.

Erik Rosado-Tamariz*, Rodolfo Muñoz-Quezada*, Daniel Fernández-Rodríguez*, Leonardo de Silva-Muñoz*, Mario R. Díaz-Guillen*.

**Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México (e-mails: erosado@ineel.mx, rmunoz@ineel.mx, daniel.fernandez@ineel.mx, leonardo.desilva@ineel.mx, mario.diaz@ineel.mx)*

Resumen: Se presenta el diseño, manufactura y pruebas de baterías de flujo tipo redox de pequeña escala. Inicialmente, se desarrolla la ingeniería inversa, manufactura, ensamblaje y pruebas experimentales a una batería de referencia a partir de una batería comercial TDM de 10 cm^2. Las pruebas al diseño inicial muestran indicios de problemas de ensamblaje, altas resistencias eléctricas normalizadas promedio de 6.5 Ωcm^2 y fugas de electrolitos para largos periodos de prueba debidos a problemas de sellado. En este sentido, se propuso un diseño mejorado de los componentes críticos, la adición de elementos complementarios, su escalamiento y la evaluación de dos procesos para el tratamiento de las membranas. Las pruebas de distribución de presiones muestran una huella de contacto optimizada en las zonas de los sellos proporcionando una adecuada conducción del fluido y la hermeticidad deseada. Asimismo, los resultados de las pruebas de desempeño muestran un comportamiento mejorado de la batería obteniéndose resistencias eléctricas normalizadas competitivas del orden de 1 Ωcm^2, así como mayores densidades de corriente y un incremento del porcentaje de la capacidad de utilización de los electrolitos del 50 al 80%, para el diseño inicial y el mejorado.

Keywords: Redox flow battery, energy storage, optimal design, performance test, pressure measurement test.

1. INTRODUCCIÓN

Para lograr una eficiente incorporación de las energías renovables intermitentes como lo son la energía eólica y solar a la red eléctrica, es necesario contar con sistemas de almacenamiento de energía estacionaría a gran escala cuyas características principales sean su eficiencia y bajo costo. En este sentido, el almacenamiento electroquímico de energía se encuentra entre las tecnologías más prometedoras, ya que es relativamente eficiente, de fácil escalabilidad, y adecuada para tiempos de descarga de varias horas (Arenas et al. (2017)). Su aplicación en la red eléctrica tiene el objetivo de suministrar estabilidad y capacidad de amortiguamiento a la red de distribución (Aneke & Wang, (2016), Wu et al. (2021)).

Las baterías de flujo llevan cerca de 40 años en continua investigación y han sido demostradas a escalas de capacidad de hasta 60 MWh. Recientemente, su competitividad se ha hecho evidente como resultado del incremento en los costos de generación de energía renovable variable ante la falta de sistemas de almacenamiento asequibles y eficientes, así como por las penalizaciones ante la reducción o desperdicio de energía renovable por el hecho de que los periodos de demanda no coindicen necesariamente con el tiempo de generación (Agbonaye et al. (2022)). Las baterías de flujo más exitosas hasta el momento se basan en los pares redox bromuro/zinc y vanadio/vanadio. Este tipo de baterías tiene la ventaja de desacoplar su potencia de descarga de su capacidad. Esto significa que la cantidad de energía almacenada depende del volumen de los electrolitos almacenado en tanques, lo que puede representar una solución óptima para una operación eficiente. Sin embargo, el costo de estos dispositivos aún limita su difusión comercial masiva (Arenas et al. (2017)).

Las baterías de flujo de compuestos orgánicos, pueden tener grandes beneficios a ese respecto. Tales compuestos pueden ser sintetizados a gran escala a partir de compuestos orgánicos derivados de la industria petroquímica y posiblemente a partir de compuestos naturales. A diferencia del vanadio, los compuestos orgánicos son abundantes y una economía de escala puede reducir su costo. Asimismo, este tipo de moléculas pueden ser diseñadas para poseer estructuras específicas que les confieran estabilidad para una larga duración en los ciclos de carga y descarga, así como la reducción o eliminación del problema de mezclado de pares redox a través de membranas (Li et al. (2022)). En este contexto, es necesario contar con diseños baterías de flujo tipo redox estructural e hidrodinámicamente seguros y eficientes, los cuales permitan caracterizar y evaluar experimentalmente el desempeño de los diferentes compuestos y moléculas con la finalidad de reducir sus costos de operación e incrementar sus eficiencias.

Una batería de flujo consiste en un conjunto de electrodos, membranas y dos placas con campos de flujo (positiva y negativa). Su principio de funcionamiento se basa en electrolizar los electrolitos a través de telas de carbón, lo cuales son estables electroquímicamente, con una configuración de red tridimensional de alta conductividad y bajo costo aplicable tanto en el ánodo y cátodo. Estos componentes constituyen una celda

ISSN en trámite

electroquímica que dependiendo de los pares redox que se estén usando tendrán un voltaje entre 0.5 y 1.5 V para sistemas acuosos. Las celdas individuales se pueden agrupar para lograr un mayor voltaje y potencia. La potencia de salida de un stack electroquímico dependerá del área y del número de celdas electroquímicas agrupadas en serie. Aumentar el número de celdas en el ensamble aumentará el voltaje, mientras que aumentar el área activa de la celda aumenta la corriente. Una celda electroquímica requiere de unas placas de compresión para facilitar en ensamblaje del conjunto y de colectores de corriente que sirven como interfaz con un equipo de pruebas o con la red eléctrica.

En este contexto, y con la finalidad de desarrollar tecnología nacional para el almacenamiento electroquímico de energía, en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) actualmente se desarrollan sistemas propios basados en baterías de flujo de bajo costo a través de proyectos demostrativos de innovación y tecnología aplicada, considerando las etapas de adopción, asimilación, desarrollo tecnológico, pruebas piloto y transferencia de tecnología.

2. METODOLOGÍA

Para caracterizar el diseño, la configuración y el comportamiento operativo de las baterías de flujo, se desarrollaron modelos geométricos tridimensionales basados en un modelo comercial de referencia, así como pruebas experimentales de distribución de presiones y de desempeño hidrodinámico de la batería. Dichos modelos y pruebas tienen como objetivo principal mejorar el entendimiento del sistema, probar teorías y predecir comportamientos ante diversos escenarios. Los diseños propuestos se centran en un módulo de la batería de flujo, ya que la configuración de esta varía en función del número de módulos que se incluyen en el arreglo.

3. MODELO DE REFERENCIA

Para el proceso de asimilación y adopción de la tecnología se utilizó como elemento de línea base de referencia el diseño de la batería de flujo TDM FUEL CELL TECHNOLOGY Modelo Flow Battery Flex-Stack, Vanadium Redox con un área activa de 10 cm^2, la cual se muestra en la Figura 1 (TDM, 2021).



Fig. 1. Batería TDM Modelo Flow Battery Flex-Stack, Vanadium Redox de 10 cm^2.

Los componentes principales y la configuración del ensamblaje de la batería de flujo de referencia se muestran en la Figura 2. Dado que el diseño de la batería es simétrico en su configuración, únicamente se muestra la mitad de la batería y los componentes que la constituyen.

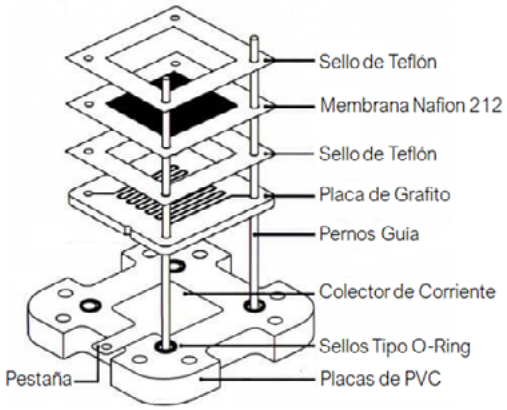


Fig. 2. Esquema de ensamblaje de la batería de flujo de referencia basada en TDM, 2021.

Como parte del proceso de asimilación de la tecnología, se desarrolló la ingeniería inversa, manufacturó, ensambló y probó experimentalmente una batería diseñada a partir del modelo de referencia con la finalidad de evaluar su comportamiento en términos de la conductividad eléctrica del sistema y su hermeticidad. Las pruebas experimentales de desempeño se llevaron a cabo empleando la estación de pruebas mostrada en la Figura 3, la cual incluye un circuito hidráulico, una bomba peristáltica y un probador de baterías cuyo objetivo fue monitorear el comportamiento del sistema durante la prueba. Para esta prueba se utilizó como electrolito de trabajo una solución salina de hidróxido de potasio 1 molar (KOH 1M).



Fig. 3. Estación de pruebas de la batería de flujo manufacturada empleada en las pruebas de desempeño.

Durante las pruebas, se verificó la hermeticidad del sistema para evaluar el comportamiento de los sellos tipo O-Ring entre la placa de CPVC y la placa monopolar de grafito, así como el comportamiento de los sellos planos que aíslan los dos campos de flujo (positivo y negativo).

ISSN en trámite

En cuanto a la conductividad eléctrica de la batería de referencia manufacturada, está se evaluó en términos de la resistencia eléctrica global del sistema. La resistencia se midió en los dos colectores de corriente y representa las contribuciones de resistencias eléctricas entre los componentes conductores de la batería como lo son la resistencia de contacto entre los colectores de corriente y las placas monopolares, la resistencia de contacto entre las placas monopolares y las capas difusoras, resistencia iónica del fluido de trabajo dentro de la capa difusora y en los canales del campo de flujo y la resistencia iónica en la membrana.

En la Figura 4, se muestran los resultados de las pruebas de desempeño de la batería de flujo manufacturada en términos de la resistencia interna normalizada de la batería de flujo (Ωcm^2) evaluada para diferentes torques en los tornillos de unión.

$$R_{IN} = R_M \cdot A_A \quad (1)$$

donde:

R_{IN} es la resistencia interna normalizada de la batería en Ωcm^2.

R_M es la resistencia eléctrica medida durante la prueba en Ω.

A_A representa el área activa de la batería en cm^2.

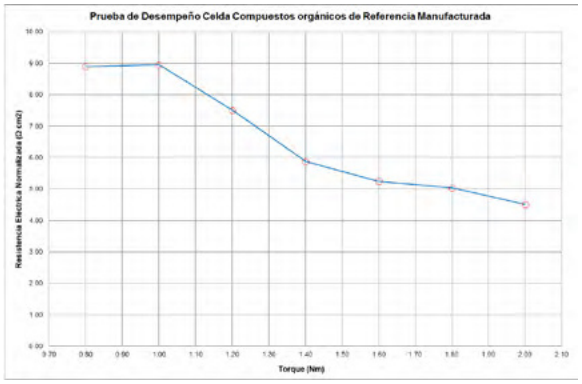


Fig. 4. Resistencia interna normalizada de la batería (Ωcm^2) evaluada para diferentes torques en los tornillos de unión.

Considerando que en la industria de baterías de flujo tipo redox se estima que para que una batería pueda desempeñarse de manera eficiente (>80% de retención de capacidad) debe presentar resistencias normalizadas del orden de 1 Ωcm^2; el desempeño de la batería de referencia manufacturada es bajo, ya que presenta niveles de resistencia eléctrica interna normalizadas promedio de 6.5 Ωcm^2.

Con la finalidad de evaluar las posibles causas que provocan los altos niveles de resistencia eléctrica en la batería de flujo de referencia manufacturada; se realizó una prueba de distribución de presiones mediante una película de medición de presión en la unión de contacto entre el colector de corriente y la placa monopolar. En la Figura 5, se muestra el perfil de distribución de presiones de contacto en la zona estudiada.

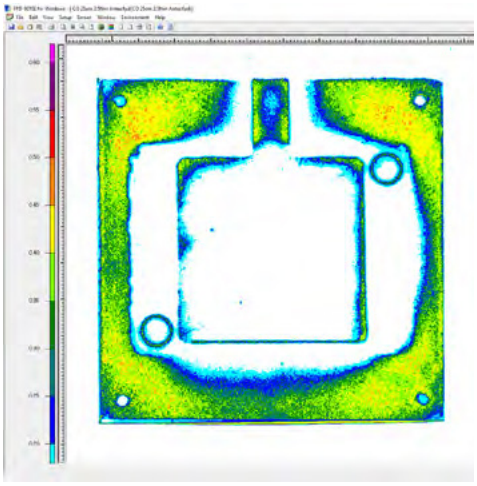


Fig. 5. Distribuciones de presiones de contacto en la zona de transición del colector de corriente y la placa monopolar de grafito de batería de flujo de referencia manufacturada.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 5, se puede observar que no existe una distribución homogénea de la presión de contacto entre el colector de corriente y placa monopolar. De la misma manera, se observa que el mayor contacto entre los elementos de la batería y las mayores distribuciones de presión de contacto se encuentran en la unión de las placas de fin y los electrodos de grafito.

Considerando que uno de los objetivos particulares del diseño de las baterías de flujo es optimizar la conductividad eléctrica y la hermeticidad de la batería, se identificó un área de oportunidad en cuanto a la mejora del diseño de la batería de flujo tipo redox de referencia; ya que las distribuciones de presión son casi nulas en la zona de interés, lo que implica un nulo contacto entre el colector de corriente y la placa de grafito, lo que conlleva a minimizar la conductividad del sistema y por consiguiente generar una alta resistencia eléctrica. De la misma manera, si se analiza el comportamiento de las distribuciones de presión mostradas en la Figura 5, se puede observar que en la zona de los sellos tipo O-Ring el contacto no es sustancial por lo que podrían presentarse fugas de fluido en la batería cuando esta opere durante largos periodos experimentales.

En este sentido, el diseño mejorado de la batería de flujo tipo redox de pequeña escala deberá evaluar diferentes alternativas enfocadas a minimizar la resistencia eléctrica en sus componentes conductores, mejorar los procesos de manufactura y ensamblaje, así como garantizar su hermeticidad.

4. DISEÑO MEJORADO DE LA BATERÍA

Teniendo en cuenta el desempeño de la batería de flujo de referencia manufacturada, así como que los niveles de resistencia eléctrica normalizada de las baterías de flujo tipo redox comercialmente competitivas son del orden de 1 Ωcm^2. Se

ISSN en trámite

incorporan las siguientes modificaciones al diseño mejorado y se escala el área activa de la batería a 26 cm^2 como una etapa intermedia del escalamiento, ya que el objetivo final es llevar esta tecnología a un nivel prototipo del orden de 1,000 cm^2.

- Incorporar placas de compresión de acero inoxidable con la finalidad de incrementa la rigidez y estabilidad estructural al sistema. De la misma manera, se utilizan rondanas y tuercas de acero inoxidable con la finalidad de mitigar el par galvánico del sistema. Asimismo, se empleó acero inoxidable ya que exhibe buena resistencia a la corrosión en electrolito blanco de hidróxido de potasio (pH 13) como el que se utiliza en estas pruebas.
- Modificar la topología del diseño de los colectores de corriente.
- Aumentar la sección transversal del sello tipo O-ring con la finalidad de mejorar el desempeño de la junta, así como cambiar el material del sello a viton para garantizar su compatibilidad química con los electrolitos.
- Adicionar un elemento de acoplamiento flexible entre las placas de CPVC y el colector de corriente que sea capaz de absorber las pequeñas deformaciones de estos dos elementos del sistema, así como las tolerancias en los procesos de manufactura del colector de corriente, las placas de grafito y las placas de CPVC.
- Incorporar birlos como elementos de unión de la batería en lugar de tornillos con el objetivo de minimizar el estancamiento y rozamiento con las placas de compresión.

En la Figura 6, se muestra el modelo CAD 3D del diseño mejorado de la batería de flujo tipo redox de 26 cm^2 de área activa.

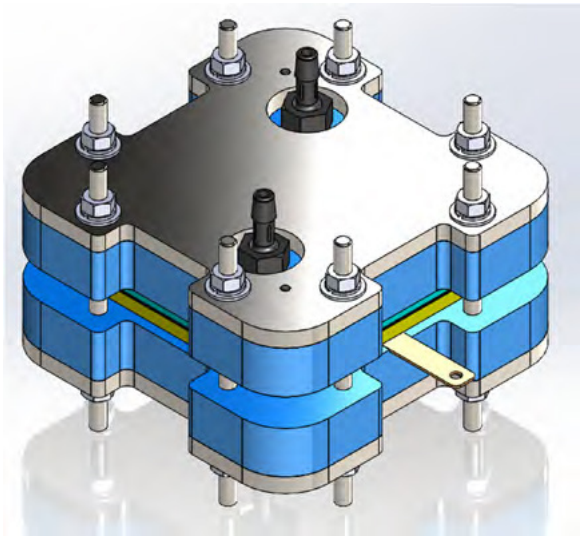


Fig. 6. Modelo CAD 3D del diseño mejorado de la batería de flujo de 26 cm^2 de área activa.

En las Figuras 7a y 7b, se muestran respectivamente el ensamblaje final de la batería de flujo mejorada, así como los cambios incorporados al diseño.

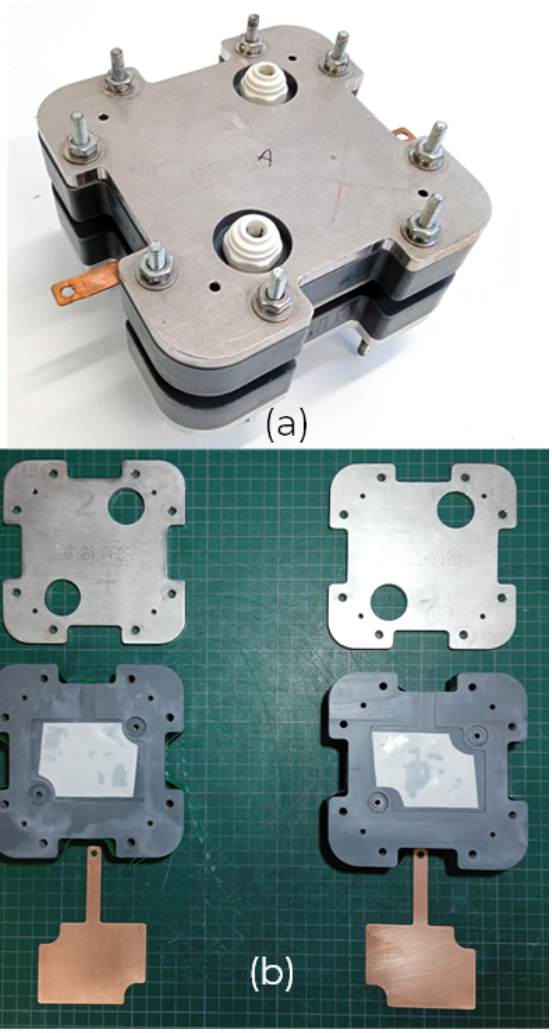


Fig. 7. Ensamblaje final de la batería de flujo mejorada de 26 cm^2 de área activa (a), cambios al diseño de las placas de CPVC, colectores de corriente, alojamientos de los sellos tipo O-Ring y los elementos de contacto flexible (b).

Una vez finalizado el proceso de diseño y manufactura de la batería de flujo mejorada, se realizó la medición de distribuciones de presiones entre el colector de corriente inferior y la placa de grafito, así como en la zona de interacción de la membrana con la placa monopolar inferior del arreglo de la batería para corroborar una adecuada conducción de fluido en el sistema y la hermeticidad de la batería. En las Figuras 8a y 8b, se muestran los perfiles de distribución de presiones para las zonas analizadas.

ISSN en trámite

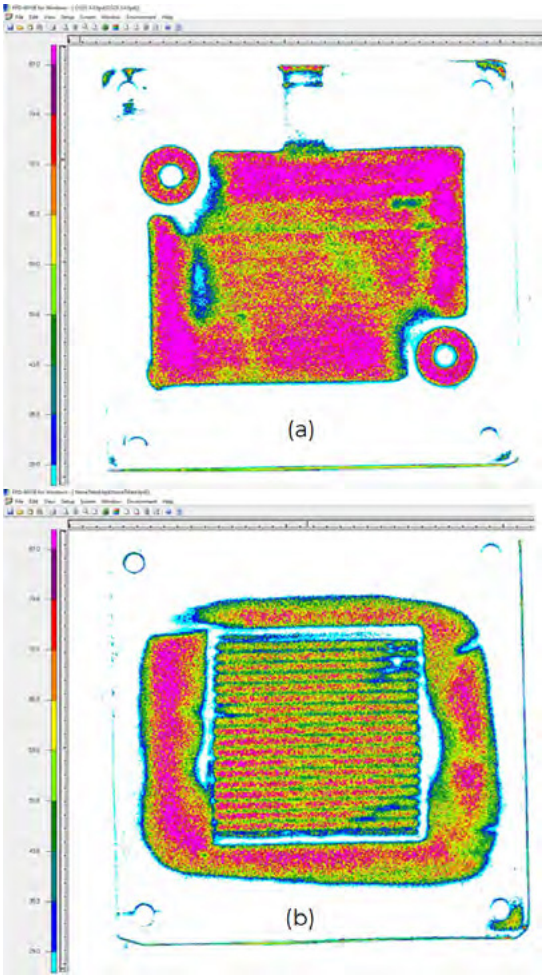


Fig. 8. Distribuciones de presiones, (a) zona de transición del colector de corriente y la placa de grafito, (b) zona de interacción de la membrana con el electrodo monopolar inferior de la batería de flujo mejorada de 26 cm^2 de área activa.

A partir de los resultados de las pruebas de distribución de presiones mostrados en las Figuras 8a y 8b, se puede observar que existe una huella de contacto y distribuciones de presión homogéneas en las zonas de interés. La Figura 8a, muestra una presión de contacto homogénea entre el colector de corriente de cobre y la placa monopolar de grafito que está directamente relacionada con la minimización de la resistencia eléctrica del sistema. De similar manera, en la Figura 8b, se puede observar la libertad para fluir del electrolito a través de los canales interdigitados del electrodo, así como la hermeticidad del sistema al crear un sello que rodea la capa difusora del electrolito. En este contexto, en la Figura 9, se muestra cómo se comprime el sistema en la zona de la membrana y la forma en que provee hermeticidad a la capa difusora durante las pruebas experimentales de la batería, corroborando así los resultados de las pruebas de distribuciones de presión.

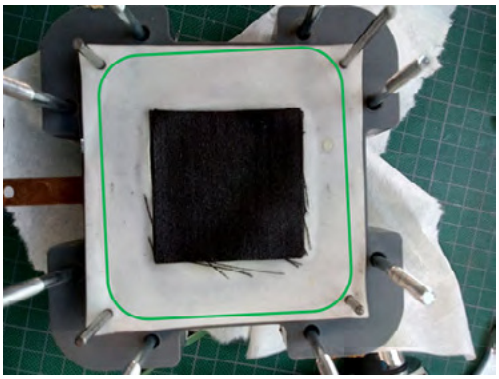


Fig. 9. Huella de hermeticidad en los sellos planos de la batería de flujo mejorada de 26 cm^2 de área activa.

Las pruebas experimentales de desempeño del diseño mejorado de la batería, se llevaron a cabo empleando la estación de pruebas mostrada en la Figura 10.

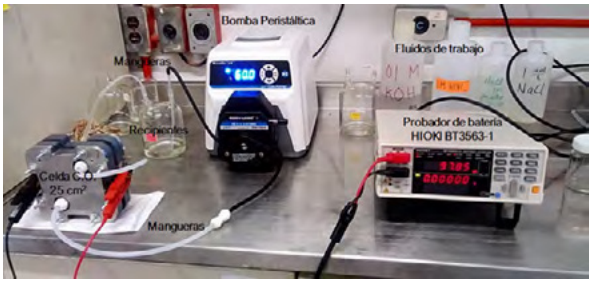


Fig. 10. Estación de pruebas de hermeticidad y conductividad eléctrica del diseño mejorado de la batería de flujo.

De forma similar a la prueba experimental de desempeño de la batería de referencia, se monitoreó y registró la conductividad eléctrica del sistema empleando un medidor de resistencia interna de baterías, mientras que, la hermeticidad del sistema se evaluó mediante el registro visual de fugas y el monitoreo del nivel del electrolito de trabajo.

Como parte del proceso de la prueba de desempeño de las baterías, las membranas de Nafion 212 fueron sometidas a un proceso de tratamiento para mejorar su conductividad iónica. Se implementaron dos métodos para el tratamiento de la membrana de Nafion 212 basados en las recomendaciones de Kwabi et al. (2020):

- El primer método consistió en hidratar la membrana sumergiéndola en agua desionizada por 10 min.
- El segundo método constó de tres etapas:
  - ✓ Calentar a 80 °C durante 20 min en agua desionizada.
  - ✓ Hidratarla en una solución de peróxido de hidrógeno 5% en 100 ml de agua desionizada 35 min.

ISSN en trámite

- ✓ Hidratarla a temperatura ambiente en hidróxido de potasio 0.1 molar (KOH0.1M) durante 180 min.

En el mismo sentido, el proceso de pruebas empleado constó de tres etapas:

- Circulación de fluido (cloruro de sodio uno molar (NaCl 1M)) en la batería durante 240 min.
- Cambiar el fluido de trabajo por hidróxido de potasio 1 molar (KOH 1M) y circularlo durante 300 min.
- Utilizar hidróxido de potasio 2 molar (KOH 2M) y circularlo por 60 min.

En las Figuras 11a y 11b, se muestra el comportamiento de dos baterías en términos de la resistencia eléctrica. La figura 11a muestra los resultados empleando el método de tratamiento uno para la membrana, mientras que los resultados del método de tratamiento número dos se muestran en la Figura 11b.

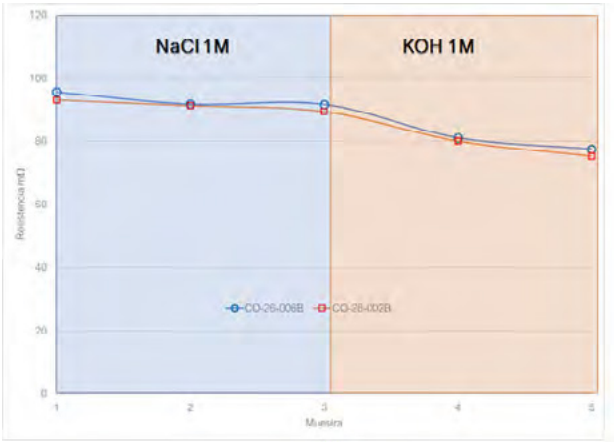


Fig. 11. Resistencia (mΩ) en la batería de flujo mejorada empleando (a) primer método y (b) el segundo método para tratamiento de las membranas.

En ambas figuras se muestran resultados para dos baterías de idéntico diseño, con la única diferencia que los resultados en color rojo son para una batería que usa una membrana nueva, mientras que los resultados en color azul son para una batería que emplea una membrana previamente utilizada. A partir de los resultados de las pruebas de desempeño, se puede c el diseño mejorado de la batería de flujo tipo redo área activa presenta resistencias eléctricas internas de 1.11 y 1.22 Ωcm^2 empleado el segundo método de las membranas y con membranas nuevas y utilizadas, respectivamente. Obteniéndose así resistencia eléctrica interna normalizada com respecto a celdas comerciales.

5. CONCLUSIONES

Basados en el diseño comercial de la batería TDM considerando las áreas de oportunidad identificad un diseño mejorado de los componentes críticos la adición de elementos complementarios, su esca un área activa de 26 cm^2 y la evaluación de do tratamiento de las membranas. Los resultados de distribución de presiones muestran una mejora sign en la huella de contacto como en las distribuciones las zonas de interés, lo que proporciona a la batería conducción del fluido y la hermeticidad deseada. E pruebas de desempeño, los resultados obtenidos mu baterías tienen un comportamiento mejorado valores de resistencias eléctricas internas normaliz de 1 Ωcm^2. De la misma manera, fue posible alca densidades de corriente y el porcentaje de util capacidad de los electrolitos se incrementó del 5(el diseño inicial y el mejorado. Estos resultados se a mayor detalle en un trabajo futuro, ya que es enfoca al desempeño mejorado de la celda en té conductividad eléctrica y la hermeticidad optim durante su operación.

REFERENCIAS

Agbonaye, O., Keatley, P., Huang, Y., Odiase, F. N. (2022). Value of demand flexibility for m energy constraint and curtailment. Renewable 487-500.

Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage and real life applications: A state of the art re *Energy*, (179) 350-377.

Arenas, L. F., Ponce de León, C., & Walsh, Engineering aspects of the design, cons performance of modular redox flow batteri storage. *Journal of Energy Storage*, (11) 119-

Kwabi, D. G., Ji, Y., & Aziz, M. J. (2020). Electr in aqueous organic redox flow batteries: a c Chemical Reviews, 120(14), 6467-6489.

Li, Z., Jiang, T., Ali, M., Wu, C., & Chen, W. (Progress in Organic Species for Redox Fl Energy Storage Materials.

TDM (2021). https://www.fuelcellstore.com/flow stak.

Wu, Y., Zhang, T., Gao, R., & Wu, C. (2021). Port of renewable energy with energy storage tec different applications from electricity grid. Ap 287, 116562.

ISSN en trámite

Estudio numérico del desempeño de un aspa de geometría fractal para enfriar fluidos.

Martínez Alvarado, L. E. * **Godínez, F.A.** **
Chávez López, O. A *** **Ramírez Cano, E. A** *
Lozoya Ponce, R.E. *** **Baray-Arana, R.E.** ***
Medrano Hermosillo, J.A. ***

* *Facultad de Ingeniería UNAM - Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (e-mail:le.martinezalvarado@gmail.com, aaron$_e$liot@hotmail.com).*
** *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, C. U., Ciudad de México, C.P. 04510, México - Polo Universitario de Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Vía de la Innovación No. 410, Autopista Monterrey-Aeropuerto, km. 10 PIIT, C.P. 66629, Apodaca Nuevo León, México (e-mail:fgodinezr@gmail.com)*
*** *Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación. Ave. Tecnológico 2909 Chihuahua, Chih., México, C.P. 31310 (e-mail: aochvzlpz@hotmail.com, ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx,rogelio.ba@chihuahua.tecnm.mx, jesus.mh@chihuahua.tecnm.mx)*

Resumen
En este trabajo se estudió un disipador en forma de aspa con geometría fractal, cuya estructura hueca soporta un medio poroso para enfriar fluidos. El disipador está construido en aluminio y emplea como medio poroso una espuma fenólica, además su diseño consta de dos secciones, una basada en la geometría fractal tipo árbol y otra en la carpeta de Sierpinski. El funcionamiento del aspa combina un flujo interno a través del medio poroso y un flujo externo por convección natural con las superficies del aspa. Las simulaciones numéricas se realizaron en el software ANSYS FLUENT utilizando como fluido de trabajo agua caliente a 52°C y 6.23 mm/s a la entrada del medio poroso. Los resultados indican una disminución de aproximadamente 4°C en la temperatura del agua durante su paso a través del aspa, donde la sección diseñada en base a la carpeta de Sierpinski permite una mayor disipación de calor en comparación con la sección del fractal tipo árbol. Asimismo, se observan zonas de estancamiento en las ventanas más pequeñas de la carpeta de Sierpinski, donde el calor se transfiere mayormente por conducción.

Keywords: Geometría fractal, medio poroso, convección natural, simulación numérica.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de geometrías fractales se ha diversificado hacia varias aplicaciones que aprovechan las características de auto similaridad de construcción fractal (**Brambila, 2017**). Los dispositivos fabricados según estas geometrías poseen una gran área de superficie y una baja masa en comparación con las geometrías euclidianas o tradicionales; algunos patrones fractales como la carpeta de Sierpinski o el patrón tipo árbol son comunes en la fabricación de antenas para telecomunicaciones (**Sivia et al., 2013; Jena et al., 2014**) como elementos estructurales en arquitectura (**Sakai et al., 2012; Sakai et al., 2019**) y como disipadores de calor residual en aplicaciones de control de temperatura (**Bejan y Lorente, 2010; Baker, 2013**). En aplicaciones de control de temperatura, el calor puede ser diseminado hacia el ambiente mediante disipadores de calor pasivos o hacia un fluido refrigerante en disipadores basados en refrigeración líquida (**Pakrouh et al., 2015; Chen y Cheng, 2005**). En ambos casos, el calor que puede ser disipado es proporcional al área de superficie. El

⋆ Correo del autor de correspondencia: le.martinezalvarado@gmail.com.

ISSN en trámite

uso de geometrías fractales en el diseño de disipadores permite obtener dispositivos con una mayor área de superficie y menor masa, en especial al compararse con geometrías euclidianas como con arreglos basados en placas paralelas (**Ebrahimi et al., 2020; Yan et al., 2021**). Calamas et al. (**2017**) experimentó con las cuatro primeras iteraciones de la carpeta de Sierpinski bajo convección natural y radiación. Señala que la efectividad por unidad de masa se incrementa tras cada iteración. También, señala que el área de superficie es mayor a la de la iteración cero a partir de la iteración cuatro. Wolfe et al. (**2019**) señala que bajo condiciones de convección natural y convección mixta la efectividad por unidad de masa de la carpeta de Sierpinski es mayor que el arreglo de placas paralelas, en especial la cuarta iteración. Baker (**2013**) analizó el desempeño térmico de aletas con geometría fractal tipo árbol y lo comparó con aletas rectangulares de igual masa, volumen y área de base. Las aletas fractales poseían una menor temperatura en la base además de ser mas efectivas disipando calor. Señala que a un ángulo de bifurcación de 90° se obtuvieron los mejores resultados. En el caso del disipadores de calor de refrigeración basados en líquida, el uso de geometrías fractales ha permitido reducir las caídas de presión y mejorar la distribución de temperaturas del diseño original de canales paralelos del modelo original propuesto en (**Tuckerman y Pease, 1981**). Alharbi et al. (**2003**) indica que cada bifurcación del fractal tipo árbol presenta una recuperación en la caída de presión y que ésta se vuelve más grande a mayores iteraciones, lo que reduce la caída de presión promedio. Pence (**2003**) comparó el desempeño entre disipadores de micro-canales paralelos y con geometría fractal tipo árbol bajo las mismas condiciones de operación. Encontró que el modelo fractal alcanzaba temperaturas 30 % más bajas que el de canales paralelos y también caídas de presión 60 % más bajas. Chen y Cheng (**2002**) evaluaron la disipación de calor entre disipadores de micro-canales paralelos y de micro-canales fractal tipo árbol con la misma área de superficie. Señalan que el disipador fractal puede disipar una mayor cantidad de calor con una menor presión de bombeo en comparación al de canales paralelos. Reddy (**2008**) estudió el desempeño térmico de micro-canales fractales tipo árbol en estado transitorio durante la etapa de encendido de chips electrónicos. Señala que la temperatura transitoria máxima alcanzada disminuía con cada iteración fractal, lo que permitía permanecer por debajo de la temperatura de protección del sistema durante el arranque.

Mientras que en la disipación pasiva el calor es disipado hacia el ambiente, en la refrigeración líquida este es transferido hacia un fluido refrigerante, el cual a la salida del disipador posee una temperatura elevada. Para reincorporarse hacia el circuito de refrigeración, el fluido primero debe perder calor. Las torres de enfriamiento son un ejemplo de equipos diseñados para disipar calor de fluidos con alta temperatura para reincorporarlos a su respectivo proceso. Ahora, como se ha mencionado, el uso de geometrías fractales favorece la disipación de calor tanto de forma pasiva como mediante refrigeración líquida; los trabajos realizados al respecto estudian los contornos de temperatura del disipador cuando este es sometido a un flujo de calor constante, como en aplicaciones de chips electrónicos. Sin embargo, a la fecha ninguna investigación se ha centrado en estudiar la disipación de calor de fluidos empleando geometrías fractales. En este trabajo se estudió mediante simulaciones numéricas la transferencia de calor de un disipador de canales fractales en forma de aspa en conjunto con un medio poroso para enfriar agua caliente. El diseño del aspa comparte similitudes con disipadores pasivos y con aquellos basados en refrigeración líquida, ya que combina un flujo interno a través de un medio poroso que satura los canales del aspa mientras que la disipación de calor se realiza hacia el ambiente. La construcción del disipador se basa en las geometrías fractales tipo árbol y carpeta de Sierpinski, mientras que el medio poroso es una espuma fenólica del tipo fibroso; es importante mencionar que ninguna combinación entre estas dos geometrías fractales ni la combinación con un medio poroso ha sido reportada la fecha. Además, el aspa fractal es parte de un novedoso ventilador (**Godínez et al. et al., 2020**) de aspas fractales que basa su funcionamiento en hacer circular fluidos a alta temperatura mediante fuerza centrifuga a través de las aspas y medio poroso; el efecto combinado de las corrientes de aire generadas por el movimiento angular del ventilador y por la interacción del fluido con las aspas provocan que la temperatura de éste descienda. Sin embargo, en este trabajo el aspa es estudiada de forma independiente al ventilador bajo una posición fija imponiendo un flujo de agua a la entrada del medio poroso. Las simulaciones fueron realizadas en Ansys FLUENT considerando la transferencia de calor conjugada entre el aspa, medio poroso y agua, a través de los mecanismos de convección forzada interna y convección natural con las superficies externas del aspa. Los resultados de temperatura muestran claras diferencias en la disipación de calor entre la carpeta de Sierpinski y el fractal tipo árbol. Además, el perfil de velocidad del aire muestra zonas donde el flujo se reduce empeorando la disipación de calor del aspa hacia el aire circundante.

2. CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN

El diseño del aspa fractal consiste en la tercera iteración del fractal tipo árbol en la mitad superior, la cual se une con la tercera iteración de la carpeta de Sierpinski en la mitad inferior del aspa como se muestra en la Figura 1. El ángulo de ramificación para el fractal tipo árbol se mantiene constante a 90°, mientras que la relación de radios hidráulicos es 0,64; las áreas de superficie del aspa interna y externa son de $3{,}50 \times 10^{-5} m$ y $6{,}89 \times 10^{-5} m$ respectivamente. En la parte interna en color verde se muestra el medio poroso cuya función es incrementar el área de superficie de contacto con el fluido y ralentizar su paso a través del aspa para que éste pierda más calor. El aspa fue fabricada en aluminio 2014 mientras el medio poroso es una espuma fenólica de celda abierta seleccionada por su alta porosidad y baja densidad, que también es utilizada por su capacidad de absorción y

ISSN en trámite

Nomenclatura

$\mathbf{U}$	Velocidad [m/s]
T	Temperatura [K]
P	Presión [Pa]
$\bar{\mathbf{U}}$	Velocidad promedio [m/s]
T_m	Temperatura promedio [K]
$\bar{P}$	Presión promedio [Pa]
d_p	Diámetro de fibra [m]
ϕ	Porosidad
C_k	Constante para medio poroso fibroso
τ_{perm}	Permeabilidad hidráulica $[m^2]$
ρ	Densidad $[kg/m^3]$
ρ_0	Densidad de referencia $[kg/m^3]$
μ	Viscosidad [kg/m s]
k	Conductividad térmica [W/m K]
k_{eff}	Conductividad térmica efectiva [W/m K]
c	Calor especifico [kJ/kg K]
R_u	Constante del gas ideal [J/mol K]
M	Masa molar [kg/kmol]
h_{prom}	Coeficiente de convección promedio $[W/m^2$ K]

retención de líquidos en aplicaciones de floristería. El aspa se fija en posición vertical donde se le suministra un flujo de agua a 6.23 mm/s y a 52°C a la entrada del conjunto aspa-medio poroso. Ambos elementos están expuestos al ambiente, por lo que la disipación de calor hacia el aire ambiente es considerada en el estudio.

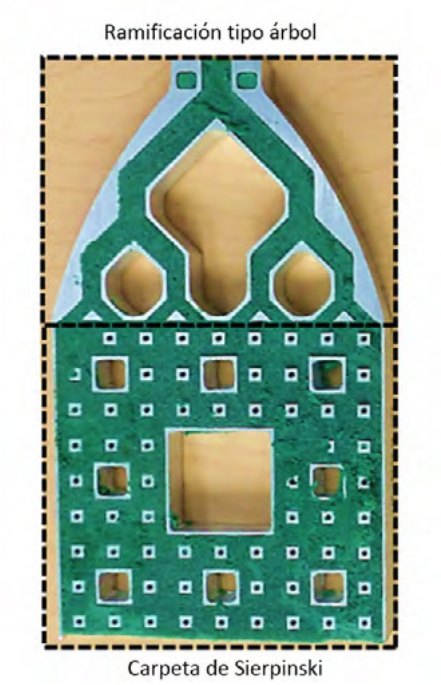


Figura 1. Modelo real del aspa fractal y medio poroso.

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Las simulaciones numéricas fueron realizadas en ANSYS FLUENT 2020. Para ello se empleo un modelo computacional para representar al aspa, medio poroso y aire exterior como el que se muestra en la Figura 2. Las simulaciones fueron realizadas en estado estacionario dado que el uso del aspa y ventilador están pensados para funcionar durante largos periodos de tiempo, donde el estado transitorio ya ha sido superado. En la tabla 1 se muestran las propiedades físicas de los materiales usadas en la simulación. Estas fueron consideradas constantes a excepción de la densidad del aire, la cual fue considerada dependiente de la temperatura para la simulación de los efectos de flotación.

Para simular la convección forzada interna, es necesario caracterizar la estructura del medio poroso. Este consiste en una espuma fenólica fibrosa altamente porosa $\phi \cong 0{,}84$ y con un diámetro promedio de fibra $d_p = 5\mu m$ según Mougel (**2019**). La permeabilidad hidráulica es calculada según la relación (**Carman, 1956**):

$$\tau_{perm} = \frac{d_p^2 \phi}{4C_{ck}} \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right)^2 \tag{1}$$

Donde $C_{ck} = 5$ para medios fibrosos. Dado que se desconoce la geometría interna de la espuma fenólica, el movimiento del agua es simulado empleando un enfoque de *volumen elemental representativo* (VER) según Bear (**1987**) por lo que las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía son dadas en magnitudes promedio como:

$$\nabla \cdot \left(\phi \bar{\mathbf{U}} \right) = 0 \tag{2}$$

$$\rho_f \nabla \cdot \left(\phi \bar{\mathbf{U}} \bar{\mathbf{U}} \right) = -\nabla \phi p + \mu_f \nabla^2 \tilde{\mathbf{U}} - \frac{\mu}{\tau_{perm}} \nabla \bar{\mathbf{U}} + \phi \mathbf{g}_z \rho_f \tag{3}$$

$$(c\rho)_f \, \bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \left(T_m \right) = k_{eff} \nabla \cdot \nabla T_m \tag{4}$$

Donde el subíndice f señala propiedades para el agua. Dado que la simulación es independiente del tiempo, se considera que el agua y el medio poroso se encuentran en equilibrio térmico a una temperatura T_m, por lo que ambos medios fueron modelados con una ecuación de energía ponderada por una conductividad térmica efectiva k_{eff} obtenida como:

$$k_{eff} = k_f \phi + k_s (1-\phi) \tag{5}$$

Donde el subíndice s indica propiedades para el aspa. Las condiciones de frontera se muestran en la Figura 3. El agua entra al medio poroso por el extremo superior del fractal tipo árbol a 6.23 mm/s y 52°C. mientras que al extremo de salida se tienen condiciones de presión atmosférica. En las caras internas del aspa, se tienen condiciones de no deslizamiento y de continuidad de calor con el medio poroso dadas como:

$$-k \frac{\partial T_s}{\partial n} = -k \frac{\partial T_m}{\partial n} \tag{6}$$

El flujo de aire debido a efectos de flotación se encuentra en régimen laminar según un número de Gr=2×10^7 y está gobernado por las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía:

$$\nabla \cdot (\rho_a \mathbf{U}) = 0 \tag{7}$$

ISSN en trámite

$$\nabla \cdot (\rho_a \mathbf{UU}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{g}_z (\rho_0 - \rho_a) \quad (8)$$

$$\mathbf{U} \cdot \nabla (T_a) = \nabla \cdot (\alpha \nabla T_a) \quad (9)$$

Donde el subíndice a indica propiedades para el aire, mientras que $\rho_0 = 1{,}184\ [kg/m^3]$ es un valor de referencia para la densidad del aire a 25°C. La densidad del aire dependiente de la temperatura es calculada usando la ecuación de estado del gas ideal:

$$\rho(T_a) = \frac{P}{\frac{R_u}{M} T_a} \quad (10)$$

Donde $R_u = 8{,}31446\ [J/molK]$ es la constante del gas ideal y $M = 28{,}97\ [kg/kmol]$ es la masa molar. El aire esta sujeto a condiciones de no-deslizamiento en las superficies del medio poroso y la aleta; de igual forma se tienen condiciones de continuidad de calor con estas superficies como:

$$-k\frac{\partial T_a}{\partial n} = -k\frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (11)$$

$$-k\frac{\partial T_a}{\partial n} = -k\frac{\partial T_m}{\partial n} \quad (12)$$

Para simular el flujo de aire, todas las caras del dominio a excepción de la superior fueron puestas bajo condiciones de frontera de *presión de entrada* y *presión de salida* respectivamente, ambas a valor de presión atmosférica. El campo de temperaturas para la estructura del aspa es gobernado por:

$$\nabla \cdot (\nabla T_s) = 0 \quad (13)$$

Cuyas condiciones de frontera térmicas ya fueron descritas.

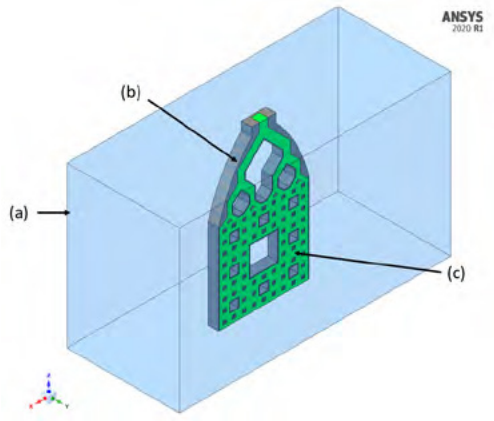


Figura 2. Modelo computacional empleado en las simulaciones numéricas: (a) dominio de aire, (b) aspa y (c) medio poroso.

3.1 Hardware de trabajo

El equipo de computo utilizado fue una estación de trabajo equipada con 64GB de ram y un procesador i7 7650U de séptima generación.

Materiales	ρ $[kg/m^3]$	c $[kJ/kgK]$	μ $[kg/ms]$	k $[W/mK]$
Aluminio 2014	2800	880	N. A	193
Espuma fenólica	15	1500	N. A	0.04
Aire	1.184	1007	2.1×10^{-5}	0.025
Agua	998	4181	0.5×10^{-3}	0.644

Tabla 1. Propiedades físicas usadas de materiales usados en la simulación.

3.2 Mallado computacional.

El mallado fue realizado en su mayoría con elementos tipo hexaedro y con elementos tipo octaedro (elementos panel de abeja) principalmente en las regiones de transición de zona. La independencia de malla se estableció una vez que residuales convergieran a valores del orden de 10^{-6}; la temperatura en la superficie fue monitoreada tras cada mallado hasta obtener variaciones de 10^{-4} °C. El número total de elementos del mallado fue de 14,825,630. Se utilizó un esquema de discretización de segundo orden, mientras que el modelo SIMPLE fue usado para el acoplamiento presión-velocidad.

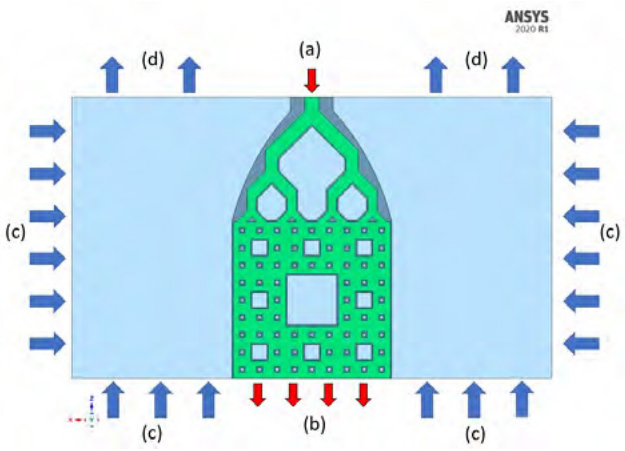


Figura 3. Condiciones de frontera para el medio y aire: (a) entrada de agua, (b) presión de salida (agua), (c) presión de entrada (aire) y (d) presión de salida (aire).

4. RESULTADOS

Los contornos de temperatura para el medio poroso y aire se muestran en las Figuras 4 y 6, mientras que el contorno de velocidad para el aire se muestra en la Figura 5. Como se puede apreciar, todos los contornos son simétricos respecto a un plano central zy al igual que la geometría del aspa. La Figura 4 muestra que a la salida del fractal tipo árbol el agua pierde ≈ 0.5°C mientras que en la carpeta de Sierpinski se disipan ≈ 3.75°C, lo que resulta en una disminución total de $\approx$

ISSN en trámite

4.25°C en todo el recorrido del agua a través del medio poroso y aleta. Esta diferencia entre las temperaturas de ambas secciones puede ser debida a la diferencia de superficies; el área externa e interna de la carpeta de Sierpinski es 4.72 y 3.12 veces mayor a las del fractal tipo árbol, respectivamente. Además, la velocidad del fluido disminuye considerablemente en la sección tipo árbol, por lo que al llegar a la carpeta de Sierpinski este se desplaza más despacio, permitiendo que una mayor cantidad de calor sea disipada hacia el aspa y, por lo tanto, hacia el aire.

Esto contrasta con los trabajos encontrados en la literatura, donde el calor fluye desde una superficie caliente hacia un fluido usado como refrigerante y se prefieren velocidades elevadas como se señala en (**Farsad et al., 2014; Hung et al., 2013**). Además, las perdidas de calor hacia el ambiente son despreciadas en la mayoría de los trabajos y se considera que la transferencia de calor sucede solo por convección interna forzada, que en el presente estudio es uno de los principales mecanismos de transferencia de calor.



Figura 4. Contorno de temperatura superficial del medio poroso.

En la Figura 5 se muestran los perfiles de velocidades del aire para un plano zx desde una vista frontal, según el sistema de referencia de la Figura 2. Se observa un flujo de aire en dirección vertical debido a las fuerzas de flotación por la dependencia de la densidad con la temperatura. Desde esta vista se muestran diferencias notables en los valores de velocidad para cada sección. En la sección correspondiente a la carpeta de Sierpinski, se observa como los valores de velocidad en las ventanas, en especial las más pequeñas, presentan niveles cercanos a cero. En estas zonas los efectos de capa límite y el que el flujo principal sea perpendicular a su orientación geométrica, provocan que el aire se estanque resultando en una circulación ineficiente a través de las ventanas de la carpeta de Sierpinski. Esto contrasta con las velocidades que se presentan en la sección tipo árbol, donde las ventanas son más grandes y se tiene una mejor circulación. El efecto de la velocidad impacta en los valores de transferencia de calor, como se muestra en la Figura 6. Debido a que el flujo de aire en esas zonas es muy pequeño, la transferencia de calor desde el aspa hacia el aire ocurre principalmente por conducción a través de la capa límite térmica, es por esta razón que al aire en las ventanas presenta valores elevados de temperatura. Sin embargo es importante mencionar que la aleta es parte de un ventilador de aspas fractales, por lo que las ventanas están pensadas para facilitar el flujo de aire durante el movimiento de rotación; el que se presenten zonas de estancamiento no constituye un inconveniente en el diseño de la geometría, es un efecto que surge debido a la orientación con la que se analiza en la presente investigación. Como se muestra en la Figura

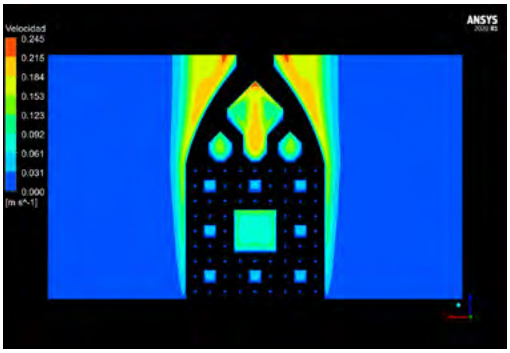


Figura 5. Perfiles de velocidad para el aire según una vista frontal.

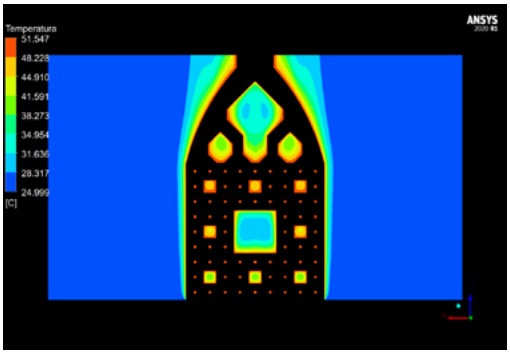


Figura 6. Contornos de temperatura para el aire según una vista frontal.

2, la superficie frontal del medio poroso esta en contacto con el aire ambiente. Es probable que en el proceso real se presenten también pérdidas de calor debido a evaporación en esa zona. Aunque en las simulaciones solo se consideran la convección interna con el medio poroso y la convección natural es posible obtener una estimación del calor perdido debido al cambio de fase. Utilizando un coeficiente de convección promedio en la superficie del medio poroso $h_{prom} = 5\ [W/m^2K]$, se calculó el calor que se pierde por evaporación y se obtuvo un valor de $10{,}1383\ W$, el cual es aproximadamente 10 veces mayor al calor que se transfiere por convección. Esto es un aspecto muy importante que debe ser considerado dentro de los mecanismos de disipación del aspa.

ISSN en trámite

5. CONCLUSIÓN

Se modeló numéricamente un disipador en forma de aspa con geometría fractal, cuya estructura hueca soporta un medio poroso para enfriar agua caliente. Los resultados de temperatura para el medio poroso indican una pérdida total de alrededor de 4°C, donde la mayor parte de la disipación ocurre en la sección diseñada con base a la carpeta de Sierpinski. Sin embargo, es también en esta sección donde el flujo de aire se vuelve más ineficiente y se crean zonas de estancamiento en las ventanas mas pequeñas de la carpeta. Se realizó una estimación del calor que se pierde por evaporación en la cara frontal del medio poroso y resultó ser aproximadamente diez veces mayor al calor perdido por convección, por lo que deberá considerarse este mecanismo de cambio fase en los trabajos futuros.

REFERENCIAS

Alharbi, A.Y., Pence, D.V., and Cullion, R.N. (2003). Fluid flow through microscale fractal-like branching channel networks. *J. Fluids Eng.*, 125(6), 1051–1057.

Baker, J. (2013). Behavior of thermally radiating tree-like fins. *Journal of heat transfer*, 135(8).

Bear, J. (1987). *Theory and applications of transport in porous media*. Springer.

Bejan, A. and Lorente, S. (2010). The constructal law of design and evolution in nature. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1545), 1335–1347.

Brambila, F. (2017). *Fractal analysis: applications in physics, engineering and technology*. BoD–Books on Demand.

Calamas, D.M., Dannelley, D.G., and Keten, G.H. (2017). Experimental Effectiveness of Sierpinski Carpet Fractal Fins in a Natural Convection Environment. *Journal of Heat Transfer*, 139(9).

Carman, P.C. (1956). Flow of gases through porous media.

Chen, Y. and Cheng, P. (2002). Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(13), 2643–2648.

Chen, Y. and Cheng, P. (2005). An experimental investigation on the thermal efficiency of fractal tree-like microchannel nets. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(7), 931–938.

Ebrahimi, K., Ebrahimi, S., and Ebrahimi, K. (2020). Fractal pattern effects on natural convection heat transfer and flow characteristics. 357–365.

Farsad, E., Abbasi, S., and Zabihi, M. (2014). Fluid flow and heat transfer in a novel microchannel heat sink partially filled with metal foam medium. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6(2).

Godínez, F., Ojesto, D., Cano, A., Martínez, L., Guzmán, E., Montoya, R., and Chávez, O. (2020). Sistema con ventilador de aspas fractales para enfriar líquidos (solicitud de patente: Mx/a/2020/012024. instituto mexicano de la propiedad industrial.

Hung, T.C., Huang, Y.X., and Yan, W.M. (2013). Thermal performance analysis of porous-microchannel heat sinks with different configuration designs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 235–243.

Jena, M.R., Mangaraj, B., and Pathak, R. (2014). A novel sierpinski carpet fractal antenna with improved performances. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2(3), 62–66.

Mougel, C., Garnier, T., Cassagnau, P., and Sintes-Zydowicz, N. (2019). Phenolic foams: A review of mechanical properties, fire resistance and new trends in phenol substitution. *Polymer*, 164, 86–117.

Pakrouh, R., Hosseini, M., Ranjbar, A., and Bahrampoury, R. (2015). A numerical method for pcm-based pin fin heat sinks optimization. *Energy Conversion and Management*, 103, 542–552.

Pence, D. (2003). Reduced pumping power and wall temperature in microchannel heat sinks with fractal-like branching channel networks. *Microscale Thermophysical Engineering*, 6(4), 319–330.

Reddy, B., Ramana, P., and Narasimhan, A. (2008). Steady and transient thermo-hydraulic performance of disc with tree-shaped micro-channel networks with and without radial inclination. *International journal of thermal sciences*, 47(11), 1482–1489.

Sakai, S., Iizawa, I., Onishi, M., Nakamura, M., Kobayashi, K., Mitsunaga, M., and Furuya, K. (2009). Fractal geometry of the ground surface and urban heat island. In *Int. Conf. Urban Clim*, 1–4. Citeseer.

Sakai, S., Nakamura, M., Furuya, K., Amemura, N., Onishi, M., Iizawa, I., Nakata, J., Yamaji, K., Asano, R., and Tamotsu, K. (2012). Sierpinski's forest: New technology of cool roof with fractal shapes. *Energy and buildings*, 55, 28–34.

Sivia, J.S., Singh, A., and Kamal, T.S. (2013). Design of sierpinski carpet fractal antenna using artificial neural networks. *International Journal of Computer Applications*, 68(8).

Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W. (1981). High-performance heat sinking for vlsi. *IEEE Electron device letters*, 2(5), 126–129.

Wolfe, T., Calamas, D.M., and Soloiu, V. (2019). Mixed and forced convection heat transfer characteristics of sierpinski carpet fractal fins. *Heat Transfer Research*, 50(3).

Yan, Y., Shen, K., Liu, Y., and He, Z.Q. (2021). Thermal-hydraulic performance enhancement of miniature heat sinks using connected y-shaped fractal micro-channels. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 166, 108487.

ISSN en trámite

Diseño de una plataforma de simulación de movimiento sísmico

Andrea Alejandra Sánchez Sierra*Claudia Cortés García**
Eladio Martínez Rayón* Andrés Blanco Ortega****Dariusz Szwedowicz*****

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-384-3841; e-mail: m20ce055@cenidet.tecnm.mx).
** (e-mail: claudia.og @cenidet.edu.mx)
*** (Eladio.mr@ cenidet.tecnm.mx) **** (andres.bo@ cenidet.tecnm.mx) ***** (dariusz.sd@ cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Este artículo presenta el diseño de un simulador sísmico en dos direcciones, el cual tiene como finalidad aplicar cargas sísmicas a edificaciones a escala. El modelado de la mesa vibratoria se realizó con el programa SolidWorks y con el software Abaqus se llevó a cabo la simulación de cada una de las piezas mecánicas. Posterior a eso se presenta él análisis cinemático del mecanismo manivela-biela del movimiento horizontal y el diseño de la leva para el movimiento vertical, para continuar con el torque y la potencia requerida del motor para cada escala sísmica. Se muestra el diseño el sistema de control de la mesa vibratoria. Para finalizar con el diseño sistema de adquisición de datos.

Keywords: mesa vibratoria, edificación a escala, sensor, mecanismo manivela-biela, leva, sistema de control.

1. INTRODUCTION

Los efectos de los sismos ocurridos en los últimos años alrededor del mundo ha sido devastadores, tales como el de la Ciudad de México (1985) que dejó alrededor de 10,000 muertos 400 edificios colapsados y 30,000 viviendas destruidas; o bien el sismo de magnitud 7.1 con epicentro en Puebla y Morelos dejando 300 muertos, 821 inmuebles afectados, el sismo de Haití que dejó alrededor de 200 mil muertos y 293 edificaciones destruidas.
La mayoría de los decesos pueden ser instantáneos o tardíos, debido al colapso de estructuras y la caída de materiales.

Actualmente, no es posible predecir un sismo ni su magnitud. Para reducir o minimizar los efectos de los sismos, se aplican distintos tipos de estrategias desde concientizar a la población al practicar y seguir protocolos de evacuación, simulacros, identificación de zonas seguras, etc., hasta realizar investigaciones orientadas al diseño seguro de edificaciones a partir del análisis de los materiales, técnicas de construcción, así como amortiguadores pasivos que minimicen el movimiento de las estructuras.
Una forma de validar las investigaciones de manera experimental es usar mesas vibratorias. Tienen la función de aplicar cargas sísmicas a edificaciones o edificios a escala de acuerdo con los grados de libertad de las mesas y la capacidad de carga.

Se han estado desarrollando mesas vibratorias como, Alcocer (1997) desarrolló una mesa vibratoria de cinco grados de libertad con un desplazamiento en dos direcciones (horizontal y vertical), con un peso máximo de 20 toneladas y está construida con sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos.

Cárdenas (2018) desarrolló una mesa vibratoria de movimiento tridimensional impulsada por actuadores neumáticos, con un tamaño de 1.5 x1.5 m, la capacidad de carga 100 kg como máximo y un desplazamiento por eje de 100 mm.

Artero (2018) desarrolló una mesa vibratoria a escala que actúa con un mecanismo de manivela-biela-corredera creando un movimiento horizontal, con una capacidad de 600 g como máximo.

Zúñiga (2018) construyó una mesa vibratoria a partir de un mecanismo Biela-manivela-deslizador, donde se integra un sistema regulador de intensidad de corriente para controlar las revoluciones del motor.

Velasco (2020) diseñó una mesa vibratoria de dos grados de libertad y movimiento en dos direcciones (horizontal y vertical), a partir de sistemas hidráulicos.

Actualmente, en CENIDET se están realizando investigaciones orientadas en este sentido, con el diseño de prototipos de amortiguamiento, identificación de puntos claves en edificios representados en modelos computacionales, etc. Sin embargo, estas investigaciones se han realizado utilizando modelos numéricos. Para validar los resultados, es necesario hacer la comprobación experimental. La principal dificultad radica en que es muy difícil hacer estas validaciones en edificios reales, dado que es imposible predecir cuándo ocurrirá el próximo

ISSN en trámite

sismo. Por lo tanto, una forma sencilla de validar resultados teóricos de manera experimental es usar mesas vibratorias.

2. Mesa vibratoria

El presente equipo (mesa vibratoria) está diseñado para aproximarse a un movimiento sísmico. Las aceleraciones de las escalas sísmicas serán a partir de movimientos senoides. La mesa vibratoria cuenta con una base, cuatro gomas elásticas, cuatro tensores elásticos, una rejilla, mecanismo manivela – biela, cuatro levas, dos flechas, dos poleas, una banda en v, y dos motores de corriente alterna monofásicos.

2.1 Parámetros de diseño de la mesa vibratoria

Para la selección de los parámetros que se muestran en la Tabla 1, se realizó una comparación de las mesas vibratorias encontradas en la literatura.

Tabla 1. Comparación de mesas vibratorias.

Mesa vibratoria	Características
Trombetti (2002)	-Servo-hidráulico -Uni-axial -Aceleración máxima 6 g -Velocidad máxima 90 cm/s -Desplazamiento 7.5 cm -Peso máximo 700 kg -Dimensión 150x150 cm
Ochoa (2006)	- Movimiento Horizontal -Grados de libertad 1 -Peso máximo 70 kg - Aceleración 1 g
Bernal (2013)	-Componente neumáticos -Peso máximo 10 kN -Grado de libertad 1 -Movimiento horizontal -Aceleración máxima ± 1g -Desplazamiento 15 Hz
Cárdenas (2018)	- Movimiento triaxial -Dimensión 1.5x 1.5 m -Desplazamiento máximo 100 kg -Grados de libertad 3 -Movimiento horizontal en dos direcciones
Artero (2018)	-Mecanismo biela manivela -Grado de libertad 1

Se seleccionaron parámetros promedios para la mesa vibratoria. Los parámetros de diseño de la mesa vibratoria se muestran en la Tabla 2. En cuanto a las características de movimiento, se estudiaron las aceleraciones máximas para cada grado sísmico.

Tabla 2. Parámetros de la plataforma

Mesa vibratoria	
Dirección	• Horizontal • Vertical
Grado de libertad	2
Peso máximo	50 kg
Aceleración	2.5 m/s^2
Sistema de control	Lazo abierto

2.2 Desarrollo de la mesa vibratoria

El diseño de la plataforma se basa en un sistema pendular como se muestra en la Fig. 1. Dispone de dos movimientos, uno por medio de un mecanismo manivela-biela que corresponde al movimiento horizontal, mientras que el movimiento vertical es proporcionado por un mecanismo de levas que es guiado por dos poleas.

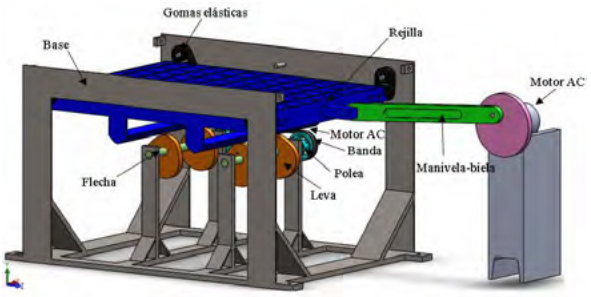


Fig. 1. Mesa vibratoria.

Es de suma importancia conocer la deformación de los elementos después de aplicar las condiciones iniciales (Tabla 3). Por lo que se realizó un estudio en el software Solidworks. La base es uno de los elementos con mayor relevancia, debido a que sostiene el peso de la rejilla y el peso de la edificación a escala (peso máximo 50 kg) a la que se le aplicarán las cargas sísmicas.

Tabla 3. Condiciones iniciales sometidos a la base

Condición inicial	Descripción
1	Acero A36
2	Empotramiento de la parte inferior (Fig. 1)
3	Fuerza de 686.7, distribuida en 10 puntos (Fig. 1) (sumaria de 50 kg peso máximo y 20 kg del peso de la rejilla).
4	Fuerza de 735.75 N, distribuida en 4 puntos (Fig. 1) (sumatoria de 20 kg del peso de la rejilla, peso máximo de 50 kg, 5 kg de levas y flechas).

En la Fig. 2 se observa la aplicación de las condiciones iniciales y la deformación. La base dispone un límite elástico de

ISSN en trámite

1.290×10^{08} N/m^2, una deformación de 13.19 mm y factor de seguridad mayor a 1.

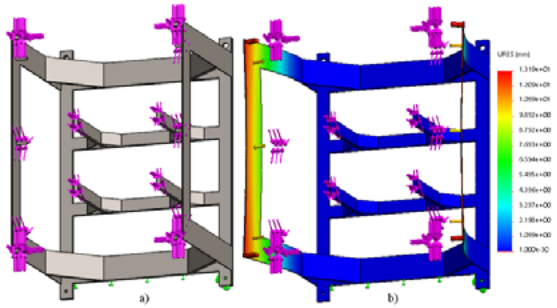


Fig.. 2. a) Condiciones iniciales, b) deformación de la mesa vibratoria.

La rejilla cuenta con un material de acero A36 y una fuerza de 735.75 N aplicada en la parte superior. En la Fig. 3 se observa el límite elástico de 1.497×10^{06} N/m^2, una deformación de 0.02399 mm y un factor de seguridad superior a 1.

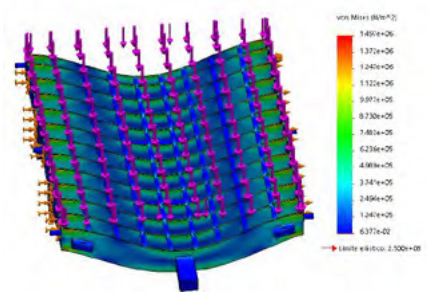


Fig. 3. Simulación.

La Tabla 4, muestra los límites elásticos y las deformaciones de cada uno de los componentes de la mesa vibratoria. Conocer los resultados de estos análisis que fueron realizados en el software Solidworks y Abaqus es importante para saber la resistencia del material.

Tabla 4. Límite elástico, deformación y factor de seguridad de los componentes de la mesa vibratoria.

Componentes	Límite elástico (N/m^2)	Deformación (mm)	Factor de seguridad
Base	129×10^{06}	1.319×10^{01}	1.9
Goma elástica	2.129×10^{02}	8.219×10^{-01}	+10
Rejilla	1.497×10^{06}	2.399×10^{-02}	+10
Flecha	5.506×10^{04}	1.075×10^{-06}	+10
Leva	2.663×10^{05}	3.263×10^{-05}	+ 10
Manivela	2.682×10^{06}	1.146×10^{-04}	93
Biela	39.43×10^{06}	8.023×10^{-02}	6.3

2.3 Diseño de la plataforma

Los elementos de la mesa vibratoria se dividen en cuatro grupos: (i) elementos mecánicos, (ii) alimentación, (iii) sistema de control y iv) sistema de adquisición de datos. El movimiento horizontal y vertical se genera por medio de motores de corriente alterna. La aceleración de cada uno de los movimientos será controlada por un variador de velocidad, de acuerdo con el grado de sismo que el usuario seleccione. En la Fig. 4 se observa la relación de los componentes de la mesa vibratoria con un sistema de control de lazo abierto.

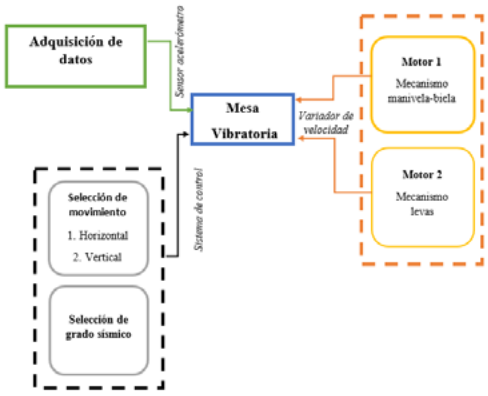


Fig. 4. Elementos de la mesa vibratoria.

2.4 Diseño mecánico

Los elementos mecánicos se pueden dividir en movimiento horizontal y movimiento vertical.

- Movimiento horizontal

  El mecanismo manivela- biela se encuentra en la plataforma dando movilidad a la rejilla, como se muestra en la Figura 5.

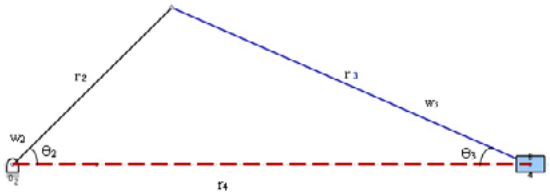


Fig. 5. Mecanismo manivela-biela.

Se calcula la aceleración del Eslabón 1 (R_2), mediante un análisis cinemático.

Donde:

R_2 eslabón - manivela
R_3 eslabón - biela
Θ_2 y Θ_3 giro en 360
W_2 velocidad angular
W_3 velocidad angular

ISSN en trámite

Paso 1: Se define la ecuación general del sistema (Ec. 1), donde r_2 es el Eslabón manivela, r_3 es el eslabón biela y r_4 longitud entre la corredera y el motor.

$$r_2 + r_3 = r_4 \quad (1)$$

Paso 2: Aplicando la primera derivada de la Ec. 1, identificamos los valores del ángulo θ_3, y la distancia de r_4.

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{-r_2 \sin(\theta_2)}{r_3}\right) \quad (2)$$

$$r_4 = r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3) \quad (3)$$

Paso 3: Desarrollando la segunda derivada de la Ec. 1, se llega a la ecuación de la velocidad angular (4) y la velocidad lineal (5).

$$w_3 = \frac{-r_2 w_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos(\theta_3)} \quad (4)$$

$$v_4 = -r_2 w_2 \sin(\theta_2) - r_3 w_3 \sin(\theta 3) \quad (5)$$

Paso 3: Posteriormente, se aplica una tercera derivada a la Ec. 1. Como resultado se conoce la aceleración angular (6) y la aceleración lineal (7).

$$\alpha_3 = \frac{w_2^2 r_2 \sin(\theta_2) - r_2 \alpha_2 \cos(\theta_2) + w_3^2 r_3 \sin(\theta_3)}{r_3 \cos(\theta_3)} \quad (6)$$

$$a_4 = -r_2 \alpha_2 \sin(\theta_2) - w_2^2 r_2 \cos(\theta_2) - \alpha_3 r_3 \sin(\theta_3) - w_3^2 r_3 \cos(\theta_3) \quad (7)$$

- Movimiento vertical

El movimiento transversal se representa de manera ascendente y descendente, como se muestra en la Fig. 6.



Fig. 6. Movimiento vertical.

Se diseñó una leva polinomial de tercer grado, con un diámetro de 3 pulgadas.
Las Ecuaciones 8 a la 12 corresponden al diseño de la leva realizado en el software Solidworks (Myszka, 2012).

$$w_{leva} = \frac{1rev}{\sum T} \quad (8)$$

$$\beta = (W)(T_n) \quad (10)$$

$$R_y = (r+s)\sin(\theta) \quad (11)$$

$$R_x = (r+s)\cos(\theta) \quad (12)$$

De acuerdo con los valores obtenidos de las Ecuación 8 a la 11(de la posición angular, sumatoria de tiempo, el desplazamiento y posición de la leva, *Rx* y *Ry*). Se ingresa a la herramienta correspondiente de Solidwork, ingresando el tipo de material (acero A36) y generando el diseño de la leva. Para la comprobación del movimiento de ascendente y descendente, se simuló un estudio de movimiento.

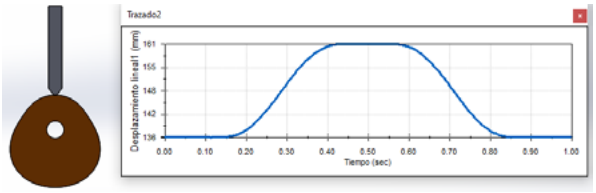


Fig. 7. Estudio de movimiento de la leva.

La carga máxima para cada una de las cuatro levas que están destinadas para la mesa vibratoria, es de 539.55 N. Para la verificación, se realizó en el software Solidworks obteniendo como resultado un límite elástico 1.901×10^{05} N/m^2, una deformación del 2.330×10^{-05} mm, y como factor de seguridad mayor a 1.

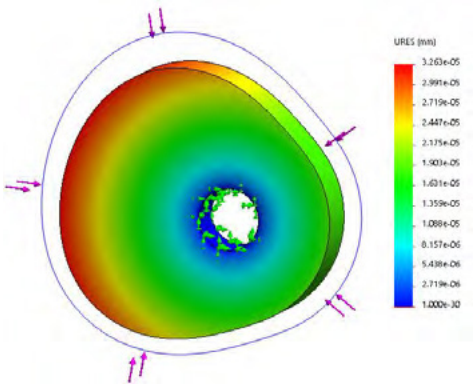


Fig. 8. Deformación de la leva.

2.5 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación para cada uno de los movimientos, estará a cargo de dos motores de corriente alterna. Para obtener el torque y la potencia requerida para cada grado de sismo, se utilizó la información proporcionada en la Tabla 5, donde se observan las aceleraciones que corresponden a cada uno de los grados sísmicos.

ISSN en trámite

Tabla 5. Aceleraciones para cada grado de sismo (Paz, 2012).

Grado sísmico	Medida de intensidad Acel. Máx., suelo (g)
I	0,001 g
II	0,002 g
III	0,005g
IV	0,015 g
V	0,030 g
VI	0,061 g
VII	0,132 g
VIII	0,306 g
IX	0,637 g
X	1,121 g
XI	2,548 g
XII	>3,567 g

- Movimiento horizontal.

Con las ecuaciones del mecanismo manivela-biela se realizó un programa en el software Matlab, tomando en cuenta el peso de la rejilla y el peso máximo. Con este programa se calculó el torque que se requiere para el motor del movimiento horizontal (Tabla 6).

Tabla 6. Torque y potencia requerida por el motor para el movimiento horizontal.

Escala	Aceleración sísmica (m/s2)	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	Hp
5	0.382	2.47	0.599	0.026
6	0.902	3.8	1.391	0.094
7	1.765	5.31	2.771	0.264
8	3.335	7.3	5.236	0.685
9	6.376	10.07	9.969	1.801
10	12.164	13.91	19.022	4.748

En la Tabla 6, se observa la aceleración aproximada de cada uno de los grados sísmicos. Es necesario ajustar la velocidad angular del motor para alcanzar la aceleración sísmica, de esta manera se procede a calcular el rpm, torque, y potencia que requiere el motor para el movimiento horizontal.

- Movimiento vertical

Con el diseño de la leva y el software Autodesk, se conocen las aceleraciones requeridas para cada grado de sismo, considerando el peso máximo entre la rejilla, el peso de la edificación a escala, eje y las levas. En la Tabla 7, se muestra la velocidad angular precisa para cada grado de sismo y la aceleración requerida. Conociendo la velocidad angular es posible calcular el torque y la potencia necesaria para el motor.

Tabla 7. Torque y potencia requerida por el motor para el movimiento vertical.

Escala	Aceleración sísmica (m/s2)	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	Hp
5	0.382	4.37	0.151	0.001
6	0.902	6.74	0.316	0.003
7	1.765	9.393	0.585	0.009
8	3.335	12.92	1.08	0.025
9	6.376	17.85	2	0.066
10	12.164	24.66	3.855	0.172

2.6 Sistema de control

El usuario tendrá la capacidad de seleccionar el tipo de movimiento y el grado del sismo. La Fig. 9, se divide en cuatro secciones. Sección a) botón de ON/OFF, sección b) elección del tipo de sismo (horizontal o vertical), sección c) variador de velocidad para el motor (de acuerdo al grado del sismo), sección d) Botón de paro de emergencia.
Por lo tanto, el sistema de control es de lazo abierto (Ogata, 2010).

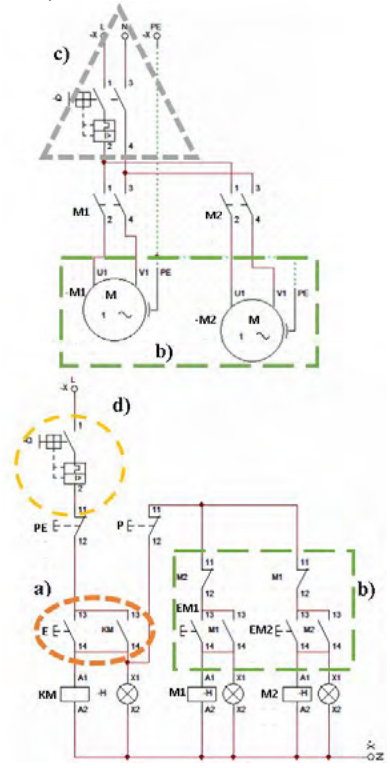


Fig. 9. Diagrama del tablero.

ISSN en trámite

2.7 Sistema de Adquisición de datos.

Existen herramientas posibles para detectar aceleraciones, son los sensores de aceleración, ellos se encargan de arrojar los acelerogramas donde se puede identificar el grado del sismo. Por lo tanto, el sistema de adquisición de datos se encarga de registrar el comportamiento de la mesa vibratoria y de la edificación a escala (Fig.10). Para la adquisición de datos se seleccionó un acelerómetro MPU6050 debido a que es amigable con Arduino, cuenta con lecturas en los tres ejes (x, y, z), y un conversor ADC.

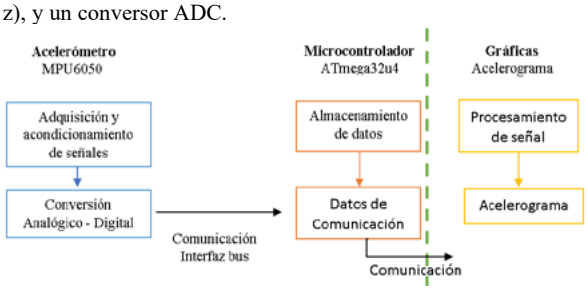


Fig. 10. Comunicación del acelerómetro y Arduino

Se realizó una interfaz gráfica de usuario (GUI), con la comunicación entre el software Arduino y LabView. El tablero dará a conocer las lecturas de los acelerómetros Fig. 11.

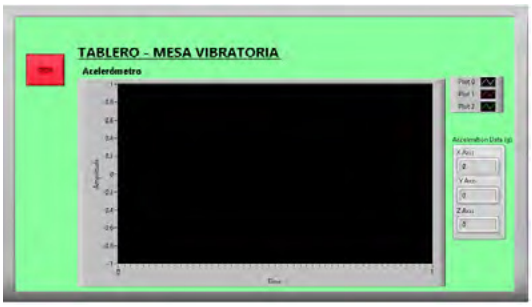


Fig. 11. GUI del tablero de lectura de sensores (MPU6050).

3. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado los resultados de los diseños mecánicos, alimentación, sistema de control y sistema de adquisición de datos, de una mesa vibratoria de dos grados de libertad, para someter a cargas sísmicas a edificaciones a escala. La metodología fue separar las etapas del diseño, por lo que se considera que fue adecuada para el óptimo diseño de la mesa vibratoria.

La mesa vibratoria consta de un sistema de dos grados de libertad, consiste en seleccionar dos movimientos (horizontal y vertical), con la capacidad de soportar 500 N como máximo, la plataforma utilizará un control ON-OFF en sistema de lazo abierto, el cual podrá realizar pruebas con aceleraciones 2.5 g. El diseño mecánico fue comprobado por medio de software de análisis de elemento finito. Los resultados de los elementos de la plataforma mostraron que el factor de seguridad es mayor a 10. Por lo tanto, podrá soportar pruebas en condiciones máximas.

La plataforma ayudará a las investigaciones que estudien los efectos de los sismos en las estructuras. Permitirá aportar recomendaciones para análisis, diseño, material, etc. de edificaciones o estructuras sismo resistentes.

El modelo diseñado de la mesa vibratoria se encuentra en proceso de construcción.

REFERENCIAS

Alcocer, S., & Muria Vila, D. (1994). *Laboratorio de la mesa vibratoria del instituto de ingeniería, UNAM.* México: UNAM.

Artero, Á., Blanco, J. L., Giménez, A., López, J., & Torres, J. L. (2018). Simulador sísmico de bajo coste para uso en prácticas de docencia. *Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7*, 299-305.

Bernal, M., Aponte, J., & Carrillo, J. (2015). Sistemas de control para mesas vibratorias: una revisión crítica. *Ingeniería y desarrollo, 33*(2), 332-355.

Cabellero Russi, D., R. Ortiz, A., Guzmán, A., & Canchila, C. (2022). Design and validation of a Low-Cost Structural Health Monitoring System for Dynamic Characterization of Structures. *Applied sciences.*

Cárdenas, C., Sandoval, C., & Gómez, J. (2018). Implementación de una mesa vibratoria triaxial neumática para el análisis de estructuras y el movimiento sísmico. *Colombiana tecnología de Avanzada*, 98-103.

L. Trombetti, T., & P. Conte, J. (2002). Mesa vibratoria diinamica: Resultados de un estudio de comparación de anáisis de prueba. *Imperial College Press, 6*(4), 513-551.

Myszka, D. H. (2012). *Máquinas y Mecanismos.* México: PEARSON.

Ochoa , C., Uribe, J. I., Londoño, J. D., & Peláez, S. (2006). *Diseño y desarrollo de una experiencia interactiva que trata el tema del comportamiento de edificaciones frente a sismo, para la sala colombiana Geodiversa del parque explora.* Medellín: Universidad EAFIT.

Paz Tiguila, E. K. (2012). *Procedimiento de cálculo para la elaboración de esectros sísmicos para el diseño sismorresistente de estruturas* . Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala .

Velasco N. Erivan, R. S. (2020). Prototipo Didactico de una mesa vibratoria bidireccional para el estudio de sistemas estructurales a pequeña escala. *Innovacion mas Desarrollo., IX*(23), 23.

Zuñiga Mociños , G., Sánchez Villegas , H. S., & Ramírez Vargas, I. (2018). Construcción de un sistema vibratorio de dos grados de libertad: Análisis modal. *Revista de Prototipos Tecnológicos* , 1-10.

ISSN en trámite

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA LAVADORA DE NIXTAMAL OPTIMIZANDO EL PROCESO DE ELABORACIÓN PARA HARINA DE TAMAL O TORTILLA

Sauza Salinas Gabriel*, Linares Navarro Carlos, Cedillo Villagrán Ignacio***, García González Juan Carlos******

** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-45-86-30-80; (e-mail: gabriel.ss@tlalnepantla.tecnm.mx)*
*** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-34-09-84-81; (e-mail: carlos.ln@tlalnepantla.tecnm.mx)*
**** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-61-78-01-29; (e-mail: ignacio.cv@tlalnepantla.tecnm.mx)*
***** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-42-74-21-64; (e-mail: juan.gg@tlalnepantla.tecnm.mx)*

Resumen: El presente proyecto muestra los resultados obtenidos en el diseño y fabricación de una máquina lavadora de nixtamal para harina de tamal o tortilla. Se empleó tecnología nacional, la cual fue desarrollada para mejorar el proceso de lavado del maíz para harina, durante la etapa de cocción con el mínimo de residuos de nixtamal y el desprendimiento de la cutícula del grano de maíz. Esto permite apoyar a los molinos y algunos tortilleros en su producción, debido a que actualmente realizan el lavado del nixtamal de forma manual, con la consecuencia de presentar problemas tales como: desgaste físico, fatiga, baja producción, limpieza no uniforme, entre otros.

La lavadora es una máquina innovadora, segura y eficiente que da solución a los problemas de la industria del maíz (tortillera y tamalera) siendo un producto viable, que ayudará a incrementar su producción, con una baja inversión, alta calidad y seguridad para el operador, debido a que el costo de las máquinas existentes en el país representa una mayor inversión para las pequeñas y medianas empresas siendo este nuestro mercado meta.

Palabras clave: Lavadora de nixtamal, Tamal, Tortilla, Tecnología Nacional.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es el cultivo más representativo de México por su importancia económica, social y cultural, se tienen muchas variantes para poder comer el maíz como en tortillas, tamales, pozole entre otros platillos típicos de México.

Con esta máquina se pretende generar un incremento de producción de harina de tamal y tortilla a un 100%, beneficiando a molinos y tortillerías, ya que disminuye el tiempo en el lavado del nixtamal, aumentado los ingresos para las PyMEs, considerando que las máquinas existentes en el mercado son de gran capacidad y volumen, de costo elevado y por tal motivo, no serían rentables para este tipo de negocios, donde la demanda es menor. Se busca desarrollar un nuevo mercado para las industrias que producen masa de nixtamal, generando una mayor calidad, así como una confiabilidad, que satisfaga sus necesidades y disminuyendo riesgos para la salud.

En este proyecto se diseñará y fabricará una máquina eficiente que satisfaga el lavado de nixtamal, con la cual el operador elimina proceso manual, ayudando a acelerar el proceso y la producción, que es una etapa indispensable y previa para su molienda. Donde se obtendrá un lavado aceptable de producto de al menos 80%, optimizando el tiempo y mejorando el proceso. Se implementarán materiales conforme a la norma "NOM-251-SSA1-2009" [1], asegurando la calidad y eficiencia de la máquina empleando tecnología nacional.

2. PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN

La ausencia de nixtamalización o el uso de cal hidratada de baja pureza en el proceso, puede producir efectos adversos en la salud de la población. Enfermedades como la pelagra, infecciones estomacales y hasta cáncer, las cuales son provocadas por micotoxinas, metales pesados y bacterias que permanecen en el producto por la ausencia o fallas en el proceso del lavado de nixtamal [2].

Actualmente en el mercado no hay máquinas disponibles para el lavado de nixtamal que estén dirigidas a las PyMEs del sector de la molienda del maíz, cuyos pequeños molinos se

ISSN en trámite

encargan del 50% de la producción de harina de maíz en el país [3].

3. OBJETIVO

Diseñar y fabricar una máquina que permita optimizar el proceso de lavado de nixtamal, con un enfoque innovador y de calidad para incrementar la productividad de harina para tamal y tortillas, reduciendo tiempo, esfuerzo y fatiga generada en el personal dedicado al mercado meta.

4. REFERENTES TEÓRICOS

Historia del maíz

El maíz es originario de México. Gracias a los restos de semillas hallados en Tehuacán, Puebla, sabemos qué hace siete mil años se inició su cultivo, a través de la fusión de plantas que crecían en forma silvestre como el *teocinte o teosinte* [4].

El nombre científico del maíz es *Zea Mays*. Al igual que muchas plantas, tiene una parte femenina y otra masculina que trabajan en conjunto para reproducirse. La parte masculina se llama borla o rastrojo, que se encuentra al final del tallo y se compone de pequeñas flores que producen polen. La parte femenina es la mazorca, que, a su vez, se integra por las hojas (que son las que se usan para envolver los tamales), los estigmas o pelos de elote, que son las flores femeninas, y los granos de elote que son los que se utilizan para hacer la masa de las tortillas. Cada grano contiene en su interior un embrión, que es la parte que se convierte en una nueva planta. Una mazorca tiene entre cuatrocientos y mil doscientos granos de maíz. Y a lo que queda cuando la mazorca se desgrana se le llama olote [4].

En 1492 Cristóbal Colón descubrió el maíz en América y lo llevó a España, desde donde se extendió por toda Europa, el norte de África, Oriente Próximo, India y China. Es el único cereal de origen americano que se ha convertido en uno de los cultivos principales en todo el mundo. El aumento de su consumo como alimento básico se debió a que rinde más que el trigo, el centeno o la cebada. Gracias a su bajo precio, se convirtió en el alimento principal y la fuente central de energía y proteínas para la gente de escasos recursos. Actualmente, el 85% de los países cultivan maíz [5].

Variedades de granos del maíz

Dada su facilidad de cultivo y su alto valor nutricional, el maíz es un alimento producido masivamente y que requiere de protección de pestes como hongos e insectos. Para ello se ha intervenido el genoma de varias especies de maíz (posee 10 pares de cromosomas, cuya información fue secuenciada en 2005) para hacerlas más resistentes al glifosato empleado como herbicida. Además, los cambios genéticos permiten que generen naturalmente proteínas de la bacteria *Bacilus thuringensis* que sirvan de pesticidas naturales. Incluso algunas cepas se han alterado para resistir a las sequías.

Existen numerosas especies de maíz, de las cuales destacan: [6].

· Maíz dulce. Usado con fines gastronómicos debido a su alto contenido de azúcares.

· Maíz de harina. Su contenido en almidones lo hacen muy blando e idóneo para la molienda y elaboración de harinas.

· Maíz de corteza dura. Variedad americana de granos extremadamente duros.

· Maíz reventador. De granos regulares, propicios para elaborar palomitas de maíz (pochoclo, cotufa, etc.) sometiéndolos a cocción en seco.

· Maíz rojo. De coloración violácea, es endémico del Perú y se le usa para fabricar chicha.

Beneficios de la nixtamalización

Sin el proceso de nixtamalización es imposible hacer tortillas, puesto que los granos no pueden molerse para crear la masa. Una tortilla hecha de maíz nixtamalizado tendrá mejor consistencia, será más nutritiva, cocerá más fácilmente y tendrá la textura adecuada [7].

Dentro de los métodos utilizados para el procesamiento de la nixtamalización se aplican los siguientes pasos [7]:

1. Desgranado. El maíz se desgrana con una olotera (mazorca sin granos).

2. Preparación.

a) Los granos una vez secos se vierten en un depósito y se cubren completamente con agua.

b) Se agrega una proporción de nixtacal, previamente diluida con agua.

3. Cocción. Los granos se cuecen hasta que la cutícula o pericarpio se pueda desprender.

4. Reposo. Una vez que el producto hierve con el nixtacal, se deja reposar por un mínimo de 12 horas.

5. Lavado. Después del reposo se tiene que enjuagar hasta que el agua sea clara.

6. Molienda. Se cuelan los granos y da paso a la molienda que puede ser artesanal o industrial.

Historia de la tortilla

El origen de la tortilla en Mesoamérica se remonta antes del año 500 a. C. Por ejemplo, en la región de Oaxaca se tienen evidencias de que la tortilla empezó a utilizarse al final de la Etapa de Villas (1500 a 500 a. C.), se sabe esto porque las planchas de arcilla utilizadas para su cocimiento aparecieron en ese entonces. Las civilizaciones precolombinas de Mesoamérica usaban el maíz como su alimento base al igual

ISSN en trámite

que la sociedad moderna de esta misma región. Las primeras crónicas de Indias describen a la tortilla mesoamericana como pan de maíz, incluso la primera traducción al español en la crónica de Francisco López de Gómara del nombre de la ciudad de "Tlaxcala" fue usada como: *"Tlaxcallan"*, que quiere decir pan cocido o casa de pan. Actualmente la toponimia de Tlaxcala se deriva del náhuatl: *tlaxcalli tlán*: lugar de tortilla [8].

Historia del tamal

El tamal *(*del náhuatl *tamalli)* es un alimento de origen mesoamericano preparado generalmente a base de masa de maíz rellena de carnes, vegetales, frutas, salsas y otros ingredientes. Son envueltos en hojas vegetales como la del mismo maíz, plátano, maguey, aguacate, entre otras, e incluso papel de aluminio o plástico, y son cocidos en agua o al vapor. Pueden tener sabor dulce o salado [9].

- Métodos de limpieza del maíz

Desde hace miles de años, la limpieza en los productos agrícolas es una práctica que poco se ha innovado desde entonces ya que, hasta hoy en día, se utilizan los mismos procesos mecánicos. No obstante, las máquinas que se han desarrollado permiten una buena limpieza de la materia prima [10].

No se sabe con exactitud quien o quienes fueron los creadores de este proceso, sin embargo, Long Towell afirma que la nixtamalización es resultado del ingenio femenino. Aunque en la actualidad en muchas zonas urbanas del país el proceso ya no es realizado por las mujeres en sus hogares, se ha optado por el consumo de tortillas de masa de nixtamal elaborado a través de un proceso industrializado que permite producir de forma masiva para satisfacer la demanda [11,12].

5. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el diseño y fabricación de la máquina lavadora de nixtamal es la que se utiliza para la creación de productos diferentes a los existentes en el mercado dando solución a los problemas de la sociedad.

Las actividades realizadas para cumplir con lo establecido en las características del producto son:

1. Estudio de mercado. Es la actividad con la que se inicia la metodología y la información debe contener el análisis de las necesidades de dicho mercado, 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. Se traducen las necesidades del mercado a características generales del producto satisfactor, estableciendo los criterios de diseño, especificaciones y restricciones.

3. Dibujos previos. Se plasma en un bosquejo la mejor solución posible que muestre las formas y elementos de la lavadora de nixtamal que den respuesta a los criterios de diseño establecidos.

4. Esquemas. Se utilizan símbolos normalizados para la representación de la interacción de los elementos y mecanismos de la máquina que actúan en la transmisión de los movimientos a diversos órganos y los aparatos de mando a distancia.

5. Cálculos. Se utilizan los procedimientos y técnicas para determinar la geometría, materiales y dimensiones de todos los componentes de la lavadora.

6. Dibujos de estudio. Se realiza el ensamble de todos los componentes, afín de detectar errores o faltantes en los elementos de máquina anteriormente calculados.

7. Prototipo. Consiste en la construcción de la lavadora de nixtamal utilizando diferentes procesos de fabricación tales como soldadura, corte, doblez y maquinados.

8. Pruebas de funcionamiento. Se realiza un programa de pruebas que permitan satisfacer plenamente lo especificado inicialmente: voltaje de alimentación, velocidad, consumo de energía, vibración, capacidad de producción. En caso de que alguna prueba resultara insatisfactoria se realizarían los ajustes y modificaciones pertinentes.

9. Dibujos de detalle. Definir cada una de las piezas que forman el producto (Estructura, Aspas, Motor Eléctrico, Tina, Poleas, Banda, Dimmer, etc.) estableciendo sus formas geométricas, dimensiones nominales, tolerancias, material de que está fabricada la pieza, tratamientos en su caso y acabados en su caso para cada elemento.

10. Dibujos de conjunto. Definir la relación física que guardan las piezas que lo integran, la identificación con números o letras de cada una de las piezas que forman el sistema y se muestra el número de ellas que intervienen en cada conjunto.

11. Manual de usuario. Asegurar el buen funcionamiento de la máquina con un manual que contenga toda la información necesaria para que el usuario la pueda utilizar sin problema alguno.

12. Estudio económico. Se lleva a cabo el presupuesto de los ingresos y egresos en la elaboración de la máquina para conocer el costo de fabricación estándar.

6. RESULTADOS

Estudio de mercado.

Con este estudio se busca saber si el producto es viable en el mercado enfocándolo a los productores de harina y tortilla blanca ubicados en la Ciudad de México y Estado de México, utilizando como herramienta la encuesta con una serie de

ISSN en trámite

preguntas abiertas y cerradas. Se calculó el número de encuestas a realizar utilizando la fórmula para calcular el tamaño de muestra para poblaciones finitas, dándonos como resultado una muestra de 50 productores y 50 consumidores.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que los clientes buscan una mayor eficiencia, ganancia a la hora de producir los productos y un menor tiempo laborando en el lavado. Este producto tiene todas las características para satisfacer las necesidades de los clientes, quienes en su mayoría se enfocan en la elaboración tradicional, a pesar que se ha comprobado que el exceso de nixtacal es dañino para el ser humano.

Por estas cuestiones es viable diseñar una máquina innovadora, ya que en el mercado no hay diseños con las funciones necesarias para el productor de harinas o tortilla.

Características del producto.

Criterios de diseño:

- Máquina ergonómica.
- Económica.
- Mínimo mantenimiento.
- Fácil limpieza.
- Segura.
- Cómoda transportación.
- Diseño compacto.

Capacidad de la tina de lavado: 20 Kg.

Dibujos previos.

A continuación, se muestra la mejor solución planteada en un dibujo que muestra las formas y elementos de la lavadora de nixtamal que dan respuesta a los criterios de diseño antes citados (Figura 1).



Figura 1. Vista isométrica.

Esquemas

Los esquemas necesarios para la operación de la lavadora de nixtamal (Figura 2) son:

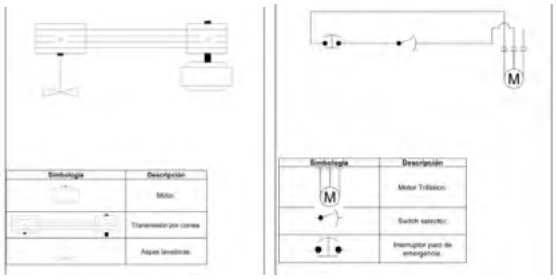


Figura 2. Esquemas Cinemático y Eléctrico.

Cálculos

Los cálculos realizados para los diferentes componentes de la máquina fueron: Potencia del motor, estructura, aspas, transmisión por correa, tornillos y componentes eléctricos.
Así mismo los elementos que conforman la máquina lavadora de nixtamal fueron analizados y modelados con el método del elemento finito en el Software SolidWorks, con el cual se determinaron esfuerzos principales a los que los elementos estarán sometidos (Figura 3).

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3.850e-008 Elemento: 7162	1.339e-004 Elemento: 9898

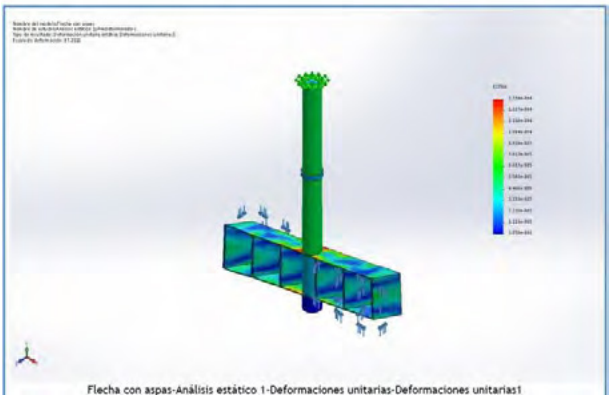


Figura 3. Estructura y aspa.

ISSN en trámite

Dibujos de estudio

En la Figura 4, se muestra la integración de todos los componentes de la máquina lavadora de nixtamal.

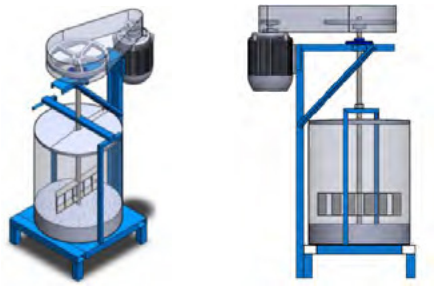


Figura 4. Vista isométrica y lateral.

Prototipo

En la Figura 5 se muestran imágenes del ensamble de los componentes de la lavadora de nixtamal.



Figura 5. Vista frontal y lateral del prototipo.

Pruebas de funcionamiento

Las pruebas realizadas a la máquina lavadora de nixtamal permiten verificar las características del producto planteadas.

Prueba de tensión de alimentación.

Se conecta el voltímetro entre las terminales del motor y se energiza este a la red de 120 volts de C.A.
La lectura del voltímetro tomada fue de 129.7 V, lo cual quiere decir que está dentro del rango de lo establecido en la norma para molinos mezcladores NMX-O-122-1976 que indica que el motor debe operar a una tensión monofásica de 120 V. de C.A. con una tolerancia de +-10 [13].

Prueba de limpieza

Se realizo la limpieza de la máquina utilizando líquidos satinados para la desinfección de todos los elementos que están en contacto directo con el maíz nixtamalizada y prolongar la vida útil de la máquina lavadora de nixtamal, así como asegurar una calidad optima de los alimentos frente a influencias químicas garantizando la higiene de la harina a elaborar.

Prueba de capacidad de producción

Se vierte dentro de la tina el maíz desde 10 kg hasta 20 kg, al igual que el agua necesaria verificando que el maíz quede completamente cubierto, para poder comprobar esto se enciende la lavadora unos segundos, después se para y verificamos que el nivel del agua no haya bajado, de ser así agregamos más agua y repetimos este paso las veces que sea necesario, una vez que esté completamente cubierto se pone a funcionar a toda su velocidad (Figura 6).

La máquina realiza un lavado en un tiempo de:
• 3 – 4 min promedio (10 kg).
• 4 – 5 min promedio (15 kg).
• 5 – 6 min promedio (20 kg).



Figura 6. Nixtamal antes y después del lavado.

Dibujos a detalle

A continuación, se muestran algunos dibujos de los componentes de la lavadora de nixtamal (Figura 7).

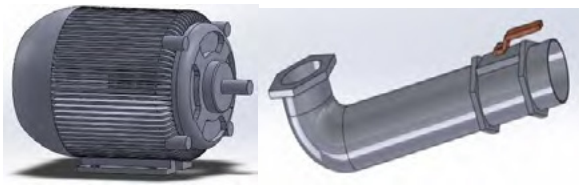


Figura 7. Motor eléctrico monofásico y tubería de desagüe.

ISSN en trámite

Dibujos de conjunto

En la Figura 8 se muestran los componentes de la máquina lavadora de nixtamal, descritos en la Tabla 1.

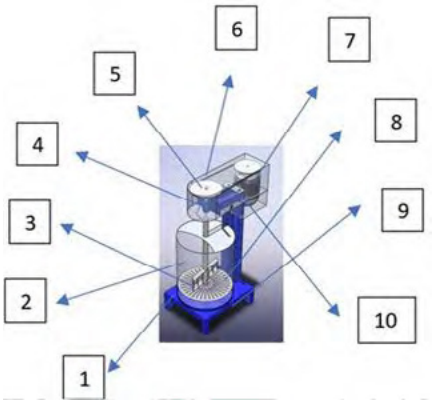


Figura 8. Conjunto de elementos.

Tabla 1. Elementos de la máquina lavadora de nixtamal.

NÚMERO DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	BASE
2	TINA
3	ASPAS
4	CHUMACERAS
5	POLEAS
6	GUARDA
7	MOTOR
8	REJILLA
9	TUBERÍA
10	BASE DEL MOTOR

7. DISCUSIÓN

Con este proyecto se ofrece a las PyMEs de molinos y tortillerías de México una máquina lavadora de nixtamal para que el proceso de lavado de nixtamal sea más eficiente y de muy buena calidad, que resulte eficiente para el productor mediante tecnología nacional.

El proceso de nixtamalización, es una etapa previa para la elaboración de la harina ya sea para tamal o tortilla.

La máquina será económica, segura, eficiente, innovadora, para cumplir con la demanda de las PyMEs reduciendo costos de inversión en maquinaria y en mantenimiento de las mismas con un lavado en un 80% o más basándose en normatividad y utilizando materiales normalizados tal como es el acero inoxidable grado alimenticio T-304.

8. CONCLUSIONES

Con base en los resultados se determinó que el proyecto resulta viable y de calidad ya que en México muchas tortillerías o molinos producen las harinas necesarias para su producción, pero deben de utilizar procesos más complejos y de los cuales implican más tiempo e inversión económica para poder sustentar las demandas de producto que tienen cada día, tomando en cuenta que esta demanda es variable dependiendo la zona y las necesidades de cada familia o individuo. Además, se comprobó que la inversión para el desarrollo del prototipo, resulta menor en comparación con las lavadoras de nixtamal que existen en el mercado actualmente, ya que estas son más utilizadas en procesos por empresas cuyo nivel de producción es basto para un mercado mucho más grande sin tomar en cuenta a las PyMEs. El mantenimiento que esta máquina se reduce a la limpieza del mismo, tiene una fácil operación con un switch selector y un botón de paro de emergencia en el caso de ser necesario, de igual manera el tamaño es bastante compacto a diferencia de nuestra competencia, siendo así un producto ideal para los locales o negocios en los que se encuentran los molinos de harina.

9. REFERENCIAS

[1]. Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009.
[2] "Pelagra: más que una historia que contar", Dermatología Cosmética, Médica y Quirúrgica, vol. 10, n.º 3, pp. 191–197, 2012. Disponible: https://www.medigraphic.com/pdfs/cosmetica/dcm-2012/dcm123g.pdf
[3] F. J. Nuñez Melgoza y J. Sempere Campello, “Estudio del mercado de producción, procesamiento, distribución y comercialización de la cadena de maíz-harina/nixtamal-tortilla en México, El Colegio de México, 2016.
[4]. "El maíz: una planta femenina y masculina, El maí-z, SI Aprendes, sitio infantil del SIAP, México". Bienvenido a infosiap.siap.gob.mx. http://infosiap.siap.gob.mx/siaprendes/contenidos/2/03-maiz/contexto-3.html (acceso enero de 2022).
[5]. "Maixitos". https://maixitos.com/maixito-la-botana-mexicana/ (acceso enero de 2022).
[6]. J. M.U. "Maíz: historia, cultivo, variedades, usos y características". Características. https://www.caracteristicas.co/maiz/#ixzz6tern0l1e (acceso enero de 2022).
[7]. "Conoce todo sobre la historia y proceso de la nixtamalización". Gourmet de México: Vive el placer de la gastronomía. https://gourmetdemexico.com.mx/comida-y-cultura/todo-lo-que-necesitas-saber-de-la-nixtamalizacion/ (acceso enero de 2022).
[8]. "Historia de la Tortilla, Romo Tortilla", Romo Tortilla, Equipo y Maquinaria para Tortillas.

ISSN en trámite

https://romotortilla.com/historia-de-la-tortilla/ (acceso enero de 2022).
[9]. "El Tamal y sus Orígenes, Tamales Emporio", Tamales. https://www.tamales.com.mx/pages/el-tamal-y-sus-origenes (acceso enero de 2022).
[10]. J. Avalos Abrahantes, "Diseño de prototipo de máquina para el lavado de granos de sorgo (MLS-2019. Versión 1.0) utilizado para producir harina en la industria alimentaria.", Trabajo de grado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2019.
[11]. J. Long Towell, "La evolución de la tecnología alimentaria Mesoamericana", Invenciones e innovaciones, vol. 18, n.º 46, pp. 4–9, marzo de 2010.
[12]. M. E. Sánchez Femat, "Análisis de la huella de carbono y contenido de nutrientes de la masa de nixtamal producida en molinos ubicados en la ZMVM bajo el modelo GTG", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, 2016.
[13]. “Molinos Mezcladores-Trituradores Industriales”, Norma Mexicana NMX-O-122-1976.

ISSN en trámite

Diseño y fabricación de una máquina boleadora de masa para mejorar el proceso de elaboración de pan blanco y dulce (Boleatec)

Sauza Salinas Gabriel*, Nieto López Martha Ofelia, Coba Martínez Marisol***, Ríos Caballero Eliezer****, López Cortes Ana Mónica*****

** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-45-86-30-80; (e-mail: gabriel.ss@tlalnepantla.tecnm.mx)*
*** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-12-40-72-29; (e-mail: martha.nl@tlalnepantla.tecnm.mx)*
**** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-33-99-62-02; (e-mail: marisol.cm@tlalnepantla.tecnm.mx)*
***** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel: 55-37-96-28-54; (e-mail: eliezer.rc@tlalnepantla.tecnm.mx)*
****** Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, CP 54070 México; (Tel:55-28-60-69-59; (e-mail: ana.lc1@tlalnepantla.tecnm.mx)*

Resumen: El presente proyecto de investigación muestra los resultados, obtenidos en el diseño y fabricación de una máquina boleadora de masa, la cual fue desarrollada para mejorar el proceso de producción de pan blanco y dulce más comunes, que permita apoyar a los panaderos que actualmente realizan el boleado de la masa en forma manual, con la consecuencia de presentar desgaste físico, baja producción, boleado no uniforme, entre otros. Boleatec es una máquina innovadora, segura y eficiente que da solución a los problemas de la industria panificadora siendo un producto viable y de calidad que ayudará a incrementar su producción con un mínimo de inversión ya que el costo de fabricación estándar obtenido nos garantiza que el precio de venta estará muy por debajo que el de las máquinas que se comercializan en el mercado nacional e internacional.

Palabras claves: Pan, Amasado, Boleado, Boleatec, Boleadora de masa, Tecnología Nacional,

1. INTRODUCCIÓN

El Estado de México y la Ciudad de México tienen una alta producción y consumo de pan dulce y blanco, ocupando el primero y segundo lugar respectivamente, según estadísticas del INEGI y la CANAINPA. Por lo cual el proyecto busca apoyar con una máquina boleadora de masa que agilicé la etapa del boleado y aseguré calidad a los panaderos ya que les ayudara a incrementar su producción [1,2].

El pan es un actual reflejo de la historia, tradición e ingredientes, donde las diferentes culturas nos dan una gran variedad de estos deliciosos y nutritivos panes, de diversas texturas y sabores. Los productores que trabajan en la elaboración de pan realizan gran esfuerzo para el amasado y boleado uniforme de la masa, ya que lo hacen de manera artesanal, obteniendo un proceso en el cual no se tiene buena calidad en el boleado.

Un boleado uniforme es una etapa importante en el proceso para elaborar los diferentes tipos de pan. Por lo que se busca lograrlo con una máquina boleadora de masa con un diseño compacto, innovadora, segura, eficiente y de un bajo costo.

¿Por qué esta industria no tiene acceso a una boleadora que asegure un boleado de calidad?

Esto se debe al que el costo de la tecnología para los fabricantes, que es muy alto, además de que las máquinas existentes en el mercado no se adaptan a sus necesidades, debido a que están desarrolladas para satisfacer principalmente las necesidades de las grandes industrias.

Por lo anterior y en base al estudio de mercado realizado a diversos productores, se desarrolló una boleadora de masa que satisface las necesidades de las pequeñas y medianas empresas, con tiempos de operación más cortos y con los más altos estándares de calidad e higiene, garantizando un boleado de masa uniforme.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente los productores de pan realizan un boleado de masa manual, el cual causa un gran número de desventajas, entre las más importantes está la fermentación inmediata de la

ISSN en trámite

masa, fatiga generada en el personal (cansancio), baja producción del pan y pérdida de tiempo.

3. OBJETIVO

Diseñar y fabricar una máquina boleadora de masa con tecnología nacional que satisfaga las necesidades de las micro, pequeñas y medianas empresas dedicadas a la elaboración del pan.

4. REFERENTES TEÓRICOS

Fabricación del pan.

La harina, sólo hace referencia a la que es elaborada a partir del trigo común, "Triticum aestivum ó vulgare", es uno de los cultivos con más tradición en México; se cultiva en diferentes estados del país, tales como: Estado de México, Michoacán, Guanajuato, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Jalisco, Oaxaca, Puebla, Veracruz, etc.

El trigo ya existía en la época de la Nueva España, la llegada de trigo a América ocurrió en los primeros viajes de conquista, en lo que refiere a México, se afirma que el grano lo trajeron los soldados de Cortés ya que encontraron granos de trigo entre sus provisiones y los sembraron durante su asentamiento en las tierras conquistadas, ya que para 1523 la sagrada tierra mexicana se cubre con hermosos campos candeales, un año después se fabrica en México pan de trigo con harina nativa [3].

Importancia del mezclado y boleado de la masa del pan.

El amasado y boleado a mano (Figura 1) o a máquina es esencial para obtener un pan de miga esponjoso y de buen sabor, el amasado es una etapa fundamental para conseguir que la masa leude adecuadamente. Primero, completa el proceso de mezcla distribuyendo el cultivo de la levadura en la masa, después, el amasado continuo permite que las proteínas de la harina se transformen en gluten, que convierte la masa en algo elástico y flexible.

Se requiere mucho estiramiento y doblamiento, pero hechos con suavidad y en forma tal que las bandas del gluten ya formadas no se rompan para tener una mejor forma del boleado. Algunos golpes de amasamiento firmes, rítmicos y cortos, con ciertos lapsos de descanso entre uno y otro para que la masa, se relaje, son mejores para desarrollar elasticidad en la masa.

Cuando el gluten se ha desarrollado suficientemente, la masa pierde su pegajosidad y se hace estirable y elástica. Numerosas burbujas diminutas aparecen justo por debajo de la superficie. Los cambios obvios que se llevan a cabo en la masa de levadura cuando se amasa adecuadamente son una evidencia convincente de que existe incluso algo mágico en el estiramiento de la masa.

Un error común cuando se amasa y bolea manualmente es que el panadero se cansa antes de que el gluten se haya desarrollado. Aumentando el tiempo de amasamiento y boleado en un 50% a 100% más arriba que lo que uno optimo, es posible que no haga daño y con frecuencia mejora la calidad del pan [4].



Figura 1. Amasado y boleado de la masa manualmente.

5. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el diseño y fabricación de la máquina boleadora es la que se emplea para la creación de nuevos productos diferentes a los existentes en el mercado dando solución a los problemas de la sociedad.

Las actividades realizadas para cumplir con lo establecido en las características del producto son:

1. Estudio de mercado. Es la actividad con la que se inicia la metodología y la información debe contener el análisis de las necesidades de dicho mercado, 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 y conocer su viabilidad en el mercado.

2. Características del producto. Se traducen las necesidades del mercado a características generales del producto satisfactor, estableciendo los objetivos (generales y específicos), criterios de diseño, especificaciones y restricciones.

3. Dibujos previos. Se plasma en un bosquejo la mejor solución posible que muestre las formas y elementos de la máquina boleadora que den respuesta a los criterios de diseño establecidos.

4. Esquemas. Se utilizan símbolos normalizados para la representación de la interacción de los elementos y mecanismos de la boleadora que actúan en la transmisión de los movimientos a diversos órganos y los aparatos de mando a distancia.

5. Cálculos. Se utilizan los procedimientos técnicos para determinar la geometría, materiales y dimensiones de todos los componentes de la boleadora.

ISSN en trámite

6. Dibujos de estudio. Se realiza el ensamble de todos los componentes, afín de detectar errores o faltantes en los elementos de máquina anteriormente calculados.

7. Prototipo. Consiste en la construcción de la boleadora utilizando diferentes procesos de fabricación tales como soldadura, corte, doblez y maquinados.

8. Pruebas de funcionamiento. Se realiza un programa de pruebas que permitan satisfacer plenamente lo especificado inicialmente: voltaje de alimentación, velocidad, consumo de energía, vibración, capacidad de producción. En caso de que alguna prueba resultara insatisfactoria se realizarían los ajustes y modificaciones pertinentes.

9. Dibujos de detalle. Definir cada una de las piezas que forman el producto (estructura, husillo, motor eléctrico, poleas, catarinas, banda, rodajas, etc.) estableciendo sus formas geométricas, dimensiones nominales, tolerancias, material de que está fabricada la pieza, tratamientos en su caso y acabados para cada elemento.

10. Dibujos de conjunto. Definir la relación física que guardan las piezas que lo integran, la identificación con números o letras de cada una de las piezas que forman el sistema y se muestra el número de ellas que intervienen en cada conjunto.

11. Manual de usuario. Asegurar el buen funcionamiento de la máquina con un manual que contenga toda la información necesaria para que el usuario la pueda operar sin problema alguno.

12. Estudio económico. Se lleva a cabo el presupuesto de los ingresos y egresos en la elaboración de la máquina para conocer el costo de fabricación estándar.

6. RESULTADOS

Estudio de mercado

El estudio se enfocó en los productores de pan blanco y de dulce ubicados en la Ciudad de México y Estado de México, utilizando como herramienta la encuesta con una serie de preguntas abiertas y cerradas. Se calculó el número de encuestas a realizar utilizando la ecuación para calcular el tamaño de muestra para poblaciones finitas, dándonos como resultado una muestra de 50 productores.

Con base en los resultados obtenidos se concluye que la boleadora de masa tendrá una muy alta demanda por las pequeñas y medianas empresas, debido a que el 90% de los encuestados están dispuestos a invertir en nueva maquinaria y el 75 % estaría dispuesto a comprar una boleadora de masa automática, por lo anterior podemos decir que la máquina es viable para el gran mercado de la panificación.

Características del producto

Criterios de diseño:

- De fácil operación.
- Económica.
- Mínimo mantenimiento.
- Fácil limpieza.
- Segura.
- Fácil transportación.
- Diseño compacto.

Tamaño:
- Ancho: 68 cm.
- Largo: 95 cm.
- Altura: 86 cm.

Boleado de masa: de 25 hasta 250 g.

Dibujos previos

A continuación, se muestra la mejor solución planteada en un dibujo que muestra las formas y elementos de la boleadora de masa que dan respuesta a los criterios de diseño antes citados (Figura 2).



Figura 2. Vista isométrica.

Esquemas [5]

Los esquemas necesarios para la operación de la boleadora de masa (Figura 3) son:

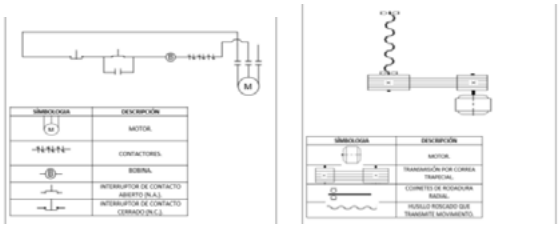


Figura 3. Esquemas Cinemático y Eléctrico.

Cálculos [6]

Los cálculos realizados para los diferentes componentes de la boleadora de masa fueron los siguientes: Potencia del motor, estructura, husillo, transmisión por correa, tornillos y componentes eléctricos.

ISSN en trámite

Así mismo los elementos que conforman la boleadora de masa fueron analizados y modelados con el método del elemento finito en el Software SolidWorks, con el cual se determinaron esfuerzos principales a los que los elementos estarán sometidos (Figura 4).

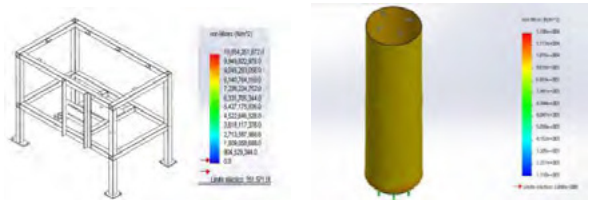


Figura 4. Estructura y camisa del husillo.

Dibujos de estudio.

Se muestra el dibujo que permite visualizar la integración de todos los elementos (Figura 5).

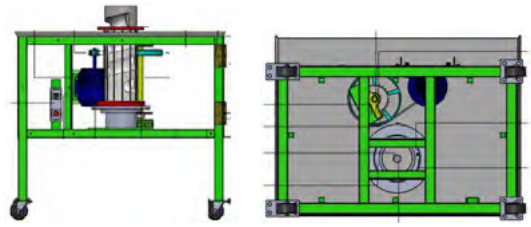


Figura 5. Vista frontal e inferior.

Prototipo

Se muestran las fotografías que nos permiten apreciar el ensamble de los componentes que conforman la boleadora de masa (Figura 6).

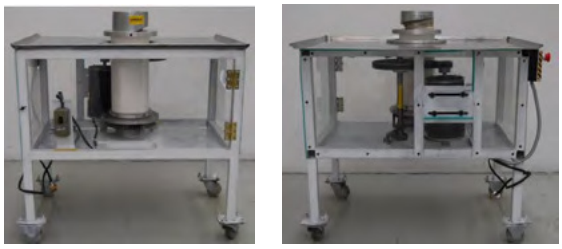


Figura 6. Vista frontal y trasera.

Pruebas de funcionamiento

Las pruebas realizadas a la máquina boleadora de masa, nos permiten verificar las características del producto planteadas a un inicio y son las siguientes:

Prueba de tensión de alimentación.

Se conecta el voltímetro entre las terminales del motor y se energiza éste a la red de 120 volts de C.A.

La lectura del voltímetro tomada fue de 129.7 V, lo cual quiere decir que está dentro del rango de lo establecido en la norma para molinos mezcladores NMX-O-122-1976 que indica que el motor debe operar a una tensión monofásica de 120 V de C.A. con una tolerancia de +-10% [7].

Prueba de consumo de energía.

Se energiza el motor a la red de alimentación de 120 volts de C.A., estando en funcionamiento la boleadora de masa a plena carga, se mide la corriente en cualquier fase.

El resultado fue un consumo de corriente de 0.40 A, estando dentro del rango establecido en la norma para molinos mezcladores [7].

Prueba de vibraciones.

Se realizó la prueba de vibraciones con el equipo SKF Asesor del estado de la máquina CMAS100-SL y bajo la norma ISO 10816-3 la cual se encarga de proporcionar los datos necesarios de los rangos de la vibración que pueda tener la máquina [8].

En base a esta prueba se obtuvieron valores aceptables de vibración en cada componente de la máquina aprobados conforme a la norma ISO 10816-3[8].

Prueba de limpieza.

Se realizó la limpieza usando líquidos satinados para la desinfección de todos los elementos que están en contacto directo con la masa y prolongar la vida útil de la máquina, así como asegurar una calidad óptima de los alimentos frente a influencias químicas garantizando la higiene del pan a elaborar.

Prueba de capacidad de producción.

Se vierten en el husillo las bolitas de masa con un peso desde los 25 hasta 150 g. Se dispone a funcionar la máquina a toda su velocidad, cuando la bolita cae el cilindro se encarga con su potencia de bolear uniformemente y salir por la parte posterior del husillo, se toma el tiempo transcurrido y así se concluye que la máquina realiza un boleado en un tiempo de 2 a 3 segundos, comprobando la calidad y eficiencia de la boleadora de masa (Figura 7).

ISSN en trámite



Figura 7. Prueba de capacidad de producción.

Dibujos a detalle

A continuación, se muestran algunos dibujos de los componentes de la boleadora de masa (Figura 8).

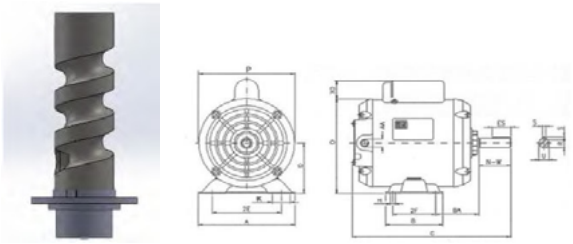


Figura 8. Husillo y motor eléctrico.

Dibujos de conjunto

Se muestra un dibujo que incorpora todos los componentes de la boleadora de masa (Figura 9) (Tabla 1).

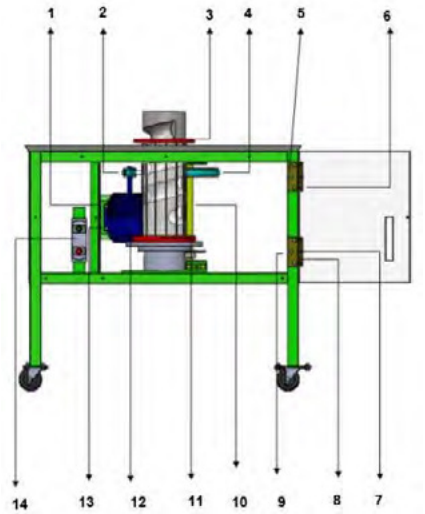


Figura 9. Conjunto de elementos.

Tabla 1. Elementos de la máquina boleadora de masa.

NÚMERO DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	MOTOR
2	POLEA IMPULSORA
3	CILINDRO DE TEFLÓN
4	POLEA CONDUCIDA
5	BISAGRA SUPERIOR
6	PUERTA DE ACRÍLICO
7	BISAGRA INFERIOR
8	ESTRUCTURA
9	RODAJA
10	EJE
11	HUSILLO HELICOIDAL
12	SOPORTE DEL MOTOR
13	SOPORTE DEL INTERRUPTOR
14	INTERRUPTOR ON/OFF

7. DISCUSIÓN

Se pretende ofrecer a la industria panificadora de México una máquina boleadora de masa que acelere el proceso de boleado de la masa mediante tecnología nacional que permita aumento de la producción y reducción de tiempos en la elaboración de pan blanco y dulce, ya que el boleado es una etapa indispensable y previa a la forma final del pan, la máquina será económica, segura, eficiente, innovadora basando su diseño hacia las pequeñas y medianas empresas, con la finalidad de ser productivos y cumplir con la demanda del cliente, reduciendo costos de mantenimiento con un boleado uniforme permitiendo una mayor durabilidad del equipo, basándose en normatividad y utilizando materiales normalizados tal como es el acero inoxidable grado alimenticio T-304.

8. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que la máquina boleadora de masa es un producto viable y de calidad, que ayudará a los productores de pan a incrementar su producción con un mínimo de inversión ya que el costo de fabricación estándar obtenido nos garantiza que el precio de venta de nuestra máquina estará muy por debajo que el de las máquinas que se comercializan en el mercado nacional. La boleadora es un producto innovador y de bajo costo, que busca apoyar a las micro, pequeñas y medianas empresas dedicadas a la elaboración del pan, debido a que garantiza un boleado de calidad y uniforme. Su capacidad para bolear va de 25 hasta 150 gramos, asegura una mayor producción por arriba de lo que se obtiene en forma artesanal, además es de fácil operación ya que cuenta con un interruptor ON/OFF y un botón de paro de emergencia por si se llegara a atorar o atascar la masa para que

ISSN en trámite

el funcionamiento del husillo sea correcto y esta máquina sea muy segura y cumpla con las normas de seguridad para el operador, es de tamaño compacto que la hace ideal para espacios de trabajo pequeños. El mantenimiento requerido será mínimo, debido a que solo se enfoca a lubricar las piezas móviles y reemplazar solo aquellas que cumplan con su vida finita. Además, podemos decir que es de fácil transportación ya que cuenta rodajas fijas y móviles para poderla desplazar con un mínimo de esfuerzo. Cabe mencionar que la máquina boleadora de masa está en trámite de patente ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial como modelo de utilidad y se cuenta con la patente de la marca Boleatec para su protección intelectual. De igual manera se está trabajando en el plan de negocios para que pueda crecer dicho proyecto y se pueda hacer llegar a las panaderías y panificadoras que lo requieran y estén dispuestas en invertir en la boleadora de masa. Por todo lo anterior podemos asegurar que la boleadora de masa es un desarrollo tecnológico que busca atender las necesidades de los panaderos.

9. REFERENCIAS

[1] "Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)". Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://www.inegi.org.mx/ (accedido en enero de 2022).
[2] "CANAINPA - Inicio". CANAINPA - Inicio. https://canainpa.org.mx/ (accedido en enero de 2022).
[3] Jofré Alfonso, S. and Hevia H, F. (2002). Rendimiento de harina y calidad panadera de seis cultivares de trigo de primaveras sembradas en tres ambientes. 1 st ed. Chillán.
[4] Barriga, X. (2011) Recetas caseras con pan de ayer. 1 st ed. Barcelona: Grijalbo.
[5] Budynas, R., Nisbett, J., Shigley, J., Murrieta Murrieta, J. and Alatorre Miguel, E. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México, D.F.: McGraw-Gill Interamericana.
[6] Chevalier, A. and Domingo Padrol, M. (1997). Dibujo industrial. México: Limus
[7] “Molinos Mezcladores-Trituradores Industriales”, Norma Mexicana NMX-O-122-1976.
[8] “Estandares internacionales de vibración mecánica”, Norma ISO 10816-3.

ISSN en trámite

Identificación de la incertidumbre en una matriz de datos de radiación solar de Xochitepec, Morelos

Márquez-Luna Lucila Virginia*, Flores-Prieto José Jassón *
García-Valladares Octavio**

**Tecnológico Nacional de México - CENIDET. Int. Internado Palmira s/n,*
Cuernavaca, Morelos, México, 62490 (e-mail: marquezlunalv@gmail.com, jose.fp@tecnm.cenidet.edu)
***Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,*
Privada Xochicalco s/n, Centro, 62580, Temixco, Morelos. (e-mail: ogv@ier.unam.mx)

Resumen: En este trabajo se presenta un estudio de la identificación de la incertidumbre de matrices de datos de radiación solar, comparando el recurso solar evaluado con matrices de datos crudas y corregidas de estaciones meteorológicas automáticas (EMA). La incertidumbre se determina con la diferencia porcentual del comparativo del recurso solar anual. La matriz de datos cruda de 4×433467 se obtiene de una EMA instalada en Xochitepec, Morelos, de junio del 2020 a mayo del 2021 de 00:00 a 23:59 *h* con pasos de tiempo de un minuto. La matriz corregida de 4×525600 se obtiene ordenando la matriz cruda respecto a una matriz patrón, se identifican los datos faltantes y fuera de intervalo, y se comparan los datos con modelos de ángulo zenit e irradiancia solar extraterrestre para filtrar los datos. Los datos erróneos se corrigen con un modelo de irradiancia solar optimizado para la zona de estudio. El recurso solar se evalúa con la integral de la irradiancia solar de la matriz de datos corregida a lo largo del periodo de estudio. En los resultados se encontró que el nivel de incertidumbre fue considerable, ya que el 71.0% de datos fueron erróneos, el 39.3% por error de coseno del sensor, el 17.5% por datos faltantes y el 14.2% por datos fuera de límite físico. El recurso solar con la matriz de datos cruda fue de 5.6 *GJ/m²-año* y con la matriz de datos corregida 8.0 *GJ/m²-año*, implicando una diferencia de 2.4 *GJ/m²-año*, equivalente al 30.7%. El tratamiento de bases de datos de las EMA resultó ser una estrategia adecuada para identificar el nivel de incertidumbre en la evaluación del recurso solar. Es de observar que, la diferencia entre el recurso solar anual evaluado con la matriz corregida y la matriz de datos de *TMY-Meteonorm*, fue del 6.9%.

Palabras clave: Radiación solar, Corrección de bases de datos, Estación meteorológica automática.

1. INTRODUCCIÓN

La información confiable sobre el recurso solar es un insumo crítico para la planificación exitosa de proyectos solares (Colle, De Abreu, y Rüther, 2001), (Šúri, Huld , y Dunlop, 2005), (Gairaa, Khellar, Benkacilai, & Guermoui, Septiembre, 2017) y (Mohammad, Al-Kayiem, Aurybi, y Khlief, 2020). El rendimiento de los sistemas de aprovechamiento solar, en una ubicación determinada, dependen de la insolación disponible (Ciolkosz, 2009). Sin embargo, el nivel de incertidumbre de las matrices de datos es incierto y esto afecta la evaluación de los escenarios económico, energético y ambiental de los proyectos de aprovechamiento solar. Más aún, el incremento exponencial en la aplicación de la tecnología solar, han incrementado considerablemente la demanda de estas matrices de datos.

Actualmente, la evaluación del recurso solar se realiza principalmente midiendo in situ con radiómetros (OLE, 1983). La medición se considera la forma más confiable, donde se determina el flujo de energía incidente (Šúri, Huld , y Dunlop, 2005). Las mediciones se realizan en observatorios meteorológicos alrededor del mundo y una gran cantidad de matrices de datos están disponible vía internet. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los datos no son tratados debidamente y la cantidad de errores es incierta (Muneer y Fairooz, 2002). Los principales errores reportados son debido a capas de arena, polvo, nieve o hielo en el domo, mal ajuste en la superficie receptora, humedad dentro del domo (Geiger, 2002) y a efectos de la orografía del lugar (Laiti, 2014). Como se puede observar, la falta de un adecuado tratamiento de las bases de datos compromete su credibilidad y certidumbre. En general, las mediciones de irradiancia se revisan en dos etapas: control técnico y control de calidad. El control técnico, considera la revisión, mantenimiento y calibración de los sensores y equipos. El control de calidad considera la identificación de los datos dudosos y su corrección mediante modelos teóricos de radiación solar. Los procedimientos de control de calidad son guiados por principios físicos que determinan las relaciones entre los parámetros medidos además de análisis estadístico (Dias Da Silva, 2014), (El Alani, 2021), (Geiger, 2002), (Journeé, 2010), (Laiti, 2014), (Muneer y Fairooz, 2002), (Sánchez-Montes y

ISSN en trámite

Flores-Prieto, 2019) y (Álvarez-Sánchez, 2017). La corrección de los datos dudosos se ha venido realizando con modelos teóricos de radiación solar (Adaramola, 2012), (Almorox, Hontoria, y Benito, 2011), (Almorox, Bocco, y Willington, 2013) y (Šúri, Huld , y Dunlop, 2005).

En el caso de México, a partir de los años setenta, los datos de radiación solar fueron mayormente determinados con la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas, EMA, del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). A partir del 2015, surgieron otras redes EMA como la Red Solarimétrica Mexicana (SE, 2013), (Comisión Nacional del Agua, 2012) y (Gonzalez-Cabrera, y otros, 2018). Los estudios de confiabilidad de las EMA en México muestran que es limitada. En diferentes trabajos se ha venido observando que, en la primera década de funcionamiento de las EMA instaladas presentan considerables incertidumbres, que han dado lugar al estudio de la confiabilidad de las bases de datos en nuestro país (Valdes-Barrón, Riveros-Rosas, Arancibia-Bulnes, y Bonifaz, 2014), (Riveros-Rosas, y otros, 2015), (Álvarez-Sánchez, 2017) y (Sánchez-Montes y Flores-Prieto, 2019). Los errores por datos faltantes y datos fuera de límite físico son los que mayormente resaltan llegando a tener hasta un 45.0% de datos erróneos, que representan incertidumbres del 63.0%. Con lo anterior se observa que, la confiabilidad de las matrices de datos es limitada, y el tratamiento de matrices de datos es incipiente y se realiza de manera aislada, por lo que la credibilidad se afecta considerablemente. En este trabajo se presenta un comparativo de la evaluación del recurso solar en Xochitepec empleando matrices de datos crudas y corregidas de radiación solar, considerando datos faltantes y fuera de límite físicos, lo que permite identificar el nivel de incertidumbre.

2. MÉTODO

En la **Figura 1** se muestra la localización de la estación meteorológica, que se ubica en el municipio de Xochitepec, Morelos, México, a 18° 74’ 70’’ latitud norte y 99° 24’ 25’’ longitud oeste, a una altura de 1112 metros sobre el nivel del mar.



Fig. 1. Localización de la EMA: a) Mapa de lo localización y b) Colocación de la EMA.

También, se presenta una fotografía de la estación meteorológica que se conforma de un multisensor para medir temperatura ambiente y humedad relativa con incertidumbres de 0.1°*C* y 0.1%, respectivamente y un sensor de radiación solar *Witich&Visser* GSWV en W/m^2 con una incertidumbre del ±3%. Los datos se registran en un adquisidor *Keysight* 34980A de 24 bits, que registra de manera automática a cada minuto. El clima es cálido subhúmedo, al igual que el 28% del territorio mexicano, cifra que lo hace uno de los climas más representativos (SEMARNAT). La temperatura ambiente promedio anual es de 27.4°*C* y la correspondiente humedad relativa es de 50.7%. En la **Figura 2** se muestra los promedios mensuales de temperatura y humedad relativa, donde se percibe que la temperatura más alta es en el mes de mayo, y la menor en enero. La mayor humedad relativa promedio mensual se presenta en septiembre y la menor en febrero.



Fig. 2. Promedios mensuales de la temperatura ambiente y humedad relativa para la zona de estudio.

En la **Figura 3** se muestra el diagrama de flujo de la estrategia de la identificación de incertidumbre, a partir de la corrección de matrices de datos solarimétricos y de la evaluación del recurso solar. La estrategia comprende las etapas de ordenamiento, identificación, corrección de los datos erróneos y evaluación del recurso solar. La matriz de datos de irradiancia solar global cruda de 4×433467 corresponde de junio del 2020 a mayo del 2021 de 00:00 a 23:59 *h* con pasos de tiempo de un minuto. La corrección de matrices de datos solarimétricos se basa en los trabajos de (Álvarez-Sánchez, 2017) y (Sánchez-Montes y Flores-Prieto, 2019) y En el ordenamiento, la matriz de datos cruda se configura de acuerdo a una matriz de datos patrón de 4×525600 con los pasos de tiempo de un minuto. Los datos erróneos se identifican con un código para clasificarlos según al tipo de error. En la **Tabla 1** se muestra el identificador para cada tipo de error. En este caso, el -111 representa el espacio de datos faltantes, *DFA*, el -222 los datos con ángulo zenit mayor a 90°, *DEC*, el -333 los datos fuera del límite superior, *DFLS*, y el -555 los datos fuera del límite inferior, *DFLI*.

ISSN en trámite

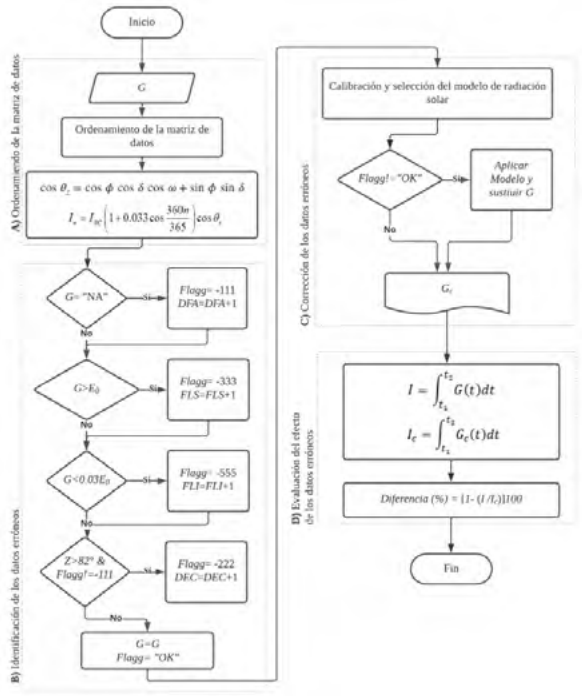


Fig. 3. Metodología de la identificación de incertidumbre mediante la corrección de matrices de datos solarimétricos y evaluación del recurso solar.

Tabla 1. Filtros

Filtro		Criterio	Descripción	Código
F1	Dato faltante *(DFA)*	*G*= "NA"	El dato correspondiente a la fecha y hora no se registró.	-111
F2	Irradiancia solar extraterrestre (*DFLS*)	$G > E_0$	Los datos medidos de irradiancia global no deben ser superiores a la irradiancia solar extraterrestre.	-333
F3	Irradiancia mínima (*DFLI*)	$G<0.03E_0$	Los datos medidos de irradiancia global no deben ser menores al 3% de la irradiancia solar extraterrestre.	-555
F4	Ángulo zenit (*DEC*)	$Z>82°$	Los datos como *DFLS* o *DFLI* cuando la altitud solar es mayor a 82° se atribuyen al error por respuesta al coseno de los piranómetros.	-222

La corrección de datos erróneos se realiza considerando el modelo de Hargreaves y Allen, (2003), cuatro modelos de Adaramola, (2012) y el modelo propuesto por Álvarez-Sánchez, (2017), todos basados en variables meteorológicas y datos de irradiancia solar extraterrestre adaptados al caso de estudio, de acuerdo con la **Tabla 2**. Los coeficientes de cada modelo se calibran para el caso de estudio, el procedimiento se realiza mediante regresiones con datos meteorológicos y mediciones de radiación solar que se identifican como no erróneos después de aplicados los filtros de la **Tabla 1.** Las regresiones se resuelven con la herramienta *Curve Fitting* de *Matlab*. Posteriormente, la radiación solar se calcula con los modelos propuestos y se comparan los valores de *RMSE* y *MAPE* de cada modelo, como herramientas de evaluación de los modelos. El modelo más preciso se emplea para sustituir las mediciones identificadas como erróneas. El recurso solar se evalúa con la integral de la irradiancia solar de la matriz de datos corregida a lo largo del periodo de estudio. El ordenamiento, identificación, corrección de datos erróneos y evaluación del recurso solar se realiza en la plataforma *RStudio*. El efecto de la corrección de datos crudos se evalúa en términos de la diferencia del recurso solar anual con la matriz de datos cruda y corregida.

Tabla 2. Modelos de radiación solar para cielo claro

Modelo		Ecuación
M1	Hargreaves y Allen, (2003)	$\frac{G}{E_0} = a(\Delta T)^{0.5}$ $\Delta T = T_{mx} - T_{mn}$
M2	Adaramola, (2012), a)	$\frac{G}{E_0} = a + b\left(\frac{HR}{100}\right)$
M3	Adaramola, (2012), b)	$\frac{G}{E_0} = a + b(T_p)$
M4	Adaramola, (2012), c)	$\frac{G}{E_0} = a + b(TR)$ $TR = T_{mx}/T_{mn}$
M5	Adaramola, (2012), d)	$\frac{G}{E_0} = a + b(TR)\left(\frac{HR}{100}\right)$
M6	Álvarez-Sánchez, (2017)	$G = a(E_0)^2 + b(E_0) + c$

Nomenclatura

G es la irradiancia solar global
E_0 es la irradiancia solar extraterrestre
a es constante
ΔT es el diferencial de temperatura
T_{mx} es la temperatura máxima
T_{mn} es la temperatura mínima
HR es la humedad relativa
T_p es la temperatura promedio
TR es el diferencial de temperatura
a, b y c son constantes
Z es el ángulo zenit

ISSN en trámite

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados del presente trabajo.

3.1 Confiabilidad de la matriz de datos de radiación solar

En la **Figura 4** se muestran datos erróneos a lo largo del periodo de estudio identificados por su tipo. La matriz de datos se conformó con un total de datos erróneos de 374025, equivalente al 71.0%, el 39.3% son por error de coseno del sensor, el 17.5% por datos faltantes, el 10.7% por datos fuera del límite inferior y el 3.5% por datos fuera de límite superior. Los errores más frecuentes fueron por error de coseno del sensor y por datos faltantes, que juntos representaban el 56.8% del total de datos erróneos. Los datos faltantes fueron 92133, equivalente a que la EMA estuviera fuera de funcionamiento 64 días. En la **Tabla 3** se muestra los resultados mensuales del análisis de confiabilidad de la matriz de datos de radiación solar. Los meses con más errores en el periodo diciembre 2020- marzo 2021 con más del 70.0% del total de datos. Los meses de diciembre 2020 y febrero 2021 tuvieron un porcentaje alto de datos fuera de límite inferior con 36.0% y 25.0%, respectivamente. Por otra parte, los meses de enero y marzo 2021 tuvieron más datos faltantes con 79.1% y 59.5%, respectivamente. Los meses con menos errores identificados fueron de junio-agosto del 2020 y mayo del 2021 con un promedio del 57.5%.

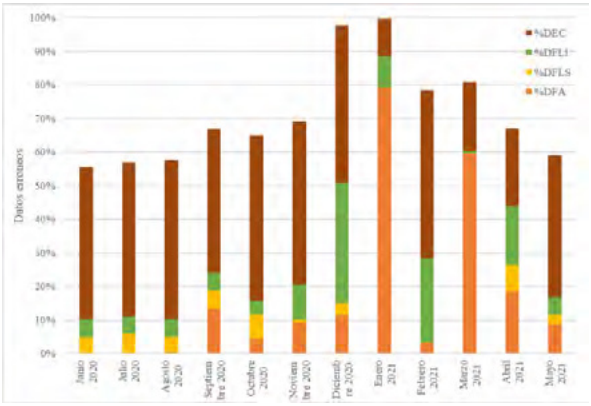


Fig. 4. Datos erróneos identificados de la matriz de datos cruda.

Tabla 3. Confiabilidad de la matriz de datos cruda

Mes	F1 (*DFA*)	F2 (*DFLS*)	F3 (*DFLI*)	F4 (*DEC*)	Total (*mensual*)
Junio 2020	0%	5%	5.4%	45%	56%
Julio 2020	0%	6%	5.3%	46%	57%
Agosto 2020	0%	4%	5.5%	47%	58%
Septiembre 2020	14%	5%	5.2%	43%	67%
Octubre 2020	4%	7%	4.1%	49%	65%
Noviembre 2020	9%	1%	10.4%	49%	69%
Diciembre 2020	11%	4%	35.7%	47%	98%
Enero 2021	79%	0%	9.4%	11%	100%
Febrero 2021	3%	0%	25.1%	50%	78%
Marzo 2021	60%	0%	0.5%	21%	81%
Abril 2021	18%	8%	17.6%	23%	67%
Mayo 2021	9%	3%	5.4%	42%	59%
Total (*anual*)	18%	4%	10.7%	39%	71%

3.2 Selección del modelo de radiación solar

En la **Tabla 4** se muestran el comparativo para la selección de modelos de radiación solar. El recurso solar se estimó para el periodo junio 2020-mayo 2021 y se comparó con los datos crudos en términos del *RMSE* y *MAPE*. El recurso solar con datos crudos fue de 5.6 GJ/m^2-*año*. El modelo con mayor precisión fue el modelo M2, de Adaramola (2012), con una diferencia en la estimación del 11% y valores de *RMSE* y *MAPE* de 12.83 kJ/m^2 y 0.09%. Seguido del modelo M6 propuesto por Álvarez-Sánchez (2017) con una diferencia en la estimación del 28% y valores de *RMSE* y *MAPE* de 10.67 kJ/m^2 y 0.09%.

Tabla 4. Comparativo de la evaluación del recurso solar (J/m^2-*año*) de los modelos de radiación solar respecto a lo calculado con los datos crudos

Modelo		Recurso solar (GJ/m^2-*año*)	Diferencia (%)	*RMSE* (kJ/m^2)	*MAPE* (%)
M1	Hargreaves y Allen, (2003)	3.8	33%	10.83	0.09
M2	Adaramola, (2012), a)	6.2	-11%	12.83	0.09
M3	Adaramola, (2012), b)	15.6	-179%	51.68	0.28
M4	Adaramola, (2012), c)	36.4	-553%	102.47	0.53

ISSN en trámite

M5	Adaramola, (2012), d)	17.1	-207%	47.30	0.23
M6	Álvarez-Sánchez, (2017)	7.1	-28%	10.69	0.09

3.3 Identificación de incertidumbre en la evaluación del recurso solar

En la **Figura 5** se muestra el recurso solar evaluado con la matriz de datos cruda y corregida, y con datos del *TMY* de *Meteonorm 8*. El recurso solar anual con datos crudos fue de 5.6 *GJ/m*^{2}, mientras que al emplear la estrategia de corrección fue de 8.0 *GJ/m*^{2}, representando una diferencia de 30.7%. Por otra parte, al emplear datos tipo *TMY,* fue de 7.5 *GJ/m2* representando una diferencia del 6.9%. Los meses con mayor diferencia en la evaluación fueron enero, diciembre, marzo y febrero, con 100%, 59.9%, 59.6% y 55.7%, respectivamente. Los meses con menor diferencia fueron junio, julio, agosto y octubre, con 3.1%, 3.2%, 5.1% y 5.7%, respectivamente. El recurso solar evaluado con la matriz de datos corregida únicamente presentó una diferencia experimental del 6.9% respecto al recurso evaluado con la matriz de datos *TMY* de *Meteonorm 8* (METEOTEST, 2020). Es de observar que, el nivel de incertidumbre es considerable ya que se presentaron meses con valores por arriba del 50% de diferencia y otros con poco más del 3% unicamente, con un 30.7% en la energía evaluada anualmente. La estrategia de corrección resultó ser adecuada para su aplicación en el tratamiento de datos de radiación solar.

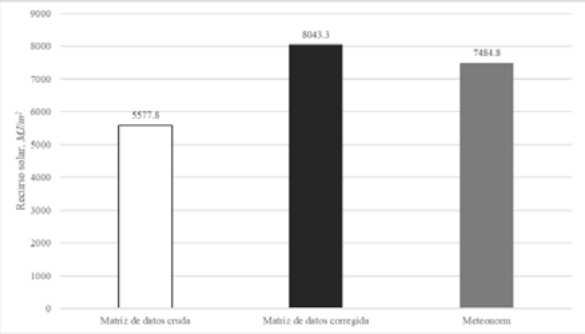


Fig. 5. Diferencia del recurso solar evaluado con la matriz cruda y corregida, también se presenta el recurso solar con la matriz de datos correspondiente de acuerdo al *TMY* de *Meteonorm 8*.

4. CONCLUSIONES

El comparativo de la evaluación del recurso solar empleando matrices de datos crudas y corregidas mostró una incertidumbre adicional considerable del 30.7%. En el caso de estudio, la matriz de datos de radiación solar cruda presentó un porcentaje considerable de datos erróneos del 71%. Los errores más representativos fueron por error de coseno del sensor con 39.3% y por datos faltantes del 17.5%, seguidos por datos fuera de limite interior con el 10.7% y límite superior con el 3.5%. La estrategia de corrección es adecuada para su aplicación en el tratamiento de datos de radiación solar por presentar una diferencia de 6.9% respecto a datos del tipo *TMY*, por lo que se observa que la estrategia de corrección es adecuada para su aplicación en el tratamiento de datos de radiación solar.

El tratamiento de matrices de datos de radiación es una alternativa para reducir la incertidumbre en la evaluación del recurso solar. Así como la identificación del nivel de incertidumbre es un indicativo del nivel de requerimiento de mantenimiento y calibración de la EMA, como se observó en la EMA estudiada.

Agradecimientos: Los autores agradecen a CONACYT por el apoyo de la BECA NACIONAL para estudio de posgrado y al proyecto PRODETES17-PCL-000020 por las facilidades para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Adaramola, M. S. (2012). Estimating global solar radiation using common meteorological data in Akure, Nigeria. *Renewable Energy, 47*, 38-44. doi:10.1016/j.renene.2012.04.005

Almorox, J., Bocco, M., & Willington, E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renewable Energy, 60*, 382-387. doi:10.1016/j.renene.2013.05.033

Almorox, J., Hontoria, C., & Benito, M. (2011). Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). *Applied Energy, 88*, 1703–1709. doi:10.1016/j.apenergy.2010.11.003

Álvarez-Sánchez, F. I. (2017). *Evaluación del recurso solar para procesos industriales en zonas factibles de México.* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca: Centro Naciona de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Ciolkosz, D. (2009). SASRAD: An hourly-timestep solar radiation database for South Africa. *Journal of Energy in Southern Africa, 20*, 25-34. doi:10.17159/2413-3051/2009/v20i1a3299

Colle, S., De Abreu, S. L., & Rüther, R. (2001). Uncertainty in economical analysis of solar water heating and photovoltaic systems. *Solar Energy, 70*(2), 131–142. doi:10.1016/S0038-092X(00)00134-1

Comisión Nacional del Agua. (2012). Los últimos años. En *Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México* (págs. 60-65). México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de www.conagua.gob.mx

Dias Da Silva, P. E. (2014). Quality Control of Solar Radiation Data within Sonda Network in Brazil: Preliminary results. *Eurosun 2014.* Aix-les-Bains, Francia.

El Alani, O. G.-D. (2021). A Visual Support of Standard Procedures for Solar Radiation Quality Control. *Int. Journal of Renewable Energy Development, 10*(3), 404-414.

ISSN en trámite

Gairaa, K., Khellar, A., Benkacilai, S., & Guermoui, M. (Septiembre, 2017). Solar radiation measurements in Algeria: case of Ghardaïa station as member of the enerMENA meteorological network. *4th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE 2017, 25-29. 141*, págs. 50-54. Berlin, Alemania: Energy Procedia. doi:10.1016/j.egypro.2017.11.010

Geiger, M. D. (2002). A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. . *Solar Energy, 73*(6), 475-480.

Gonzalez-Cabrera, A. E., Riveros-Rosas, D., Valdés-Barrón, M. G., Bonifaz-Alfonzo, Velasco-Herrera, V. M., Estevez-Perez,, H. R., & Carabali, G. (2018). New reference solarimetric network for. *AIP Conference Proceedings.* Obtenido de https://doi.org/10.1063/1.5067192

Journeé, M. B. (2010). Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurement network. *Solar Energy, 85*, 72-86.

Laiti, L. A. (2014). A Solar Atlas for the Trentino Region in the Alps: Quality Control of Surface Radiation Data. *European Geosciences Union General Assembly 2014, EGU 2014. 59*, págs. 336-343. Energy Procedia.

METEOTEST. (2020). *Meteonorm Global Meteorological Database.* Switzerland : METEOTEST .

Mohammad, S. T., Al-Kayiem, H. H., Aurybi, M. A., & Khlief, A. K. (2020). Measurement of global and direct normal solar energy radiation in Seri Iskandar and comparison with other cities of Malaysia. *Case Studies in Thermal Engineering, 18*, 100591. doi:10.1016/j.csite.2020.100591

Muneer, T., & Fairooz, F. (2002). Quality control of solar radiation and sunshine measurements - lessons learnt from processing worlwide databases. . *Building Services Engineering Research and Technology, 23*(3), 151-166.

OLE. (1983). Medición directa de la radiación solar. En *Solarimetría y evaluación energética solar* (págs. 13-14). Quito: Organización Lationaméricana de Energía.

Riveros-Rosas, D., Arancibia-Bulnes, C. A., Bonifaz, R., Medina, M. A., Peón, R., & Valdes, M. (2015). Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR model. *Renewable Energy, 75*, 21-29. doi:10.1016/j.renene.2014.09.013

Sánchez-Montes, J. G., & Flores-Prieto, J. J. (2019). Evaluación del recurso solar en Jiutepec, Morelos, corrigiendo datos fuera de intervalo de una estación meteorológica autimática. *XLIII Semana Nacional de Energía Solar 2019.* Nayarit.

SEMARNAT. (s.f.). *Atlas Digital Geográfico.* Recuperado el Mayo de Junio de 2021, de http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html

SE. (2013). NMX-AA-166/1-SCFI-2013. En *Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas - Parte 1: Especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales.* México.

Šúri, M., Huld , T. A., & Dunlop, E. D. (2005). PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *International Journal of Sustainable Energy, 24*(2), 255–67. doi:10.1080/14786450512331329556

Valdes-Barrón, M., Riveros-Rosas, D., Arancibia-Bulnes, C. A., & Bonifaz, R. (2014). The solar Resource Assessment in Mexico: State of the Art. *2013 ISES Solar World Congress. 57*, págs. 1299 – 1308. Energy Procedia. doi:10.1016/j.egypro.2014



INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EDUCATIVA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Diseño de un Curso Online para la Autocapacitación de profesores en Competencias Técnicas Clave

Marina Moreno Montiel. * Manuel Juárez Pacheco. **

**Universidad Autónoma del Estado de Morelos. e-UAEM. Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62209 (marinamm@uaem.mx).*
***TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, DDAeI. Int. Internado Palmira. Cuernavaca, México.* C.P. 62490. *(e-mail: manuel.jp@cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: Con el uso masivo de Ambientes Virtuales de Aprendizaje en Educación superior, por la pandemia del Covid 19, se evidenció la necesidad de apoyar a los profesores en el desarrollo de competencias técnicas clave para mejorar su desempeño en cursos b y *e-Learning*. Con base en encuestas y el análisis de las solicitudes recurrentes de ayuda, de profesores y estudiantes al soporte técnico de e-UAEM, se identificaron algunas competencias técnicas que requieren los profesores y con base en éstas y los Entornos personales de aprendizaje se propone el diseño de un curso que les permita capacitarse a su propio paso. Las habilidades identificadas se articulan con las recomendaciones de organismos internacionales sobre las competencias digitales docentes. Se presenta el diseño a nivel arquitectura del curso *online*.

Palabras clave: Cursos autogestionados, *e-Learning*, *b-Learning*, Formación de profesores, AVA, Educación superior, Entornos personales de aprendizaje.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio del uso de Ambientes Virtuales de Aprendizaje (AVA) se han presentado diversos problemas en torno a la capacitación de los profesores, en particular con el surgimiento de la pandemia de Covid 19, el uso de los AVA (entre otros dispositivos para la impartición de cursos) paso de ser algo opcional y tangencial al uso casi obligado en las Instituciones de Educación Superior (IES) en México y el mundo.

La problemática se ha manifestado en aspectos que por lo general no tocan los cursos técnicos, centrados unos en el reconocimiento y uso de las recursos y actividades de los Sistemas Administradores del Aprendizaje (LMS del inglés *Learning Management Systems*) y, por otro lado, cursos sobre metodologías didácticas sean o no innovadoras y con posibilidad o no de ajustarse a los AVA.

Entre estos extremos se ha dejado de lado el que los profesores sean capaces de administrar los recursos de la plataforma de una forma eficiente y cómoda para ellos y para sus estudiantes (Remesal, 2020). Superar estas problemáticas puede realizarse al ofrecer un curso autogestionado que les permita cubrir las carencias – a partir de un diagnóstico – con base en información adecuada a sus competencias y les ofrezca un espacio de intercambio de experiencias y soluciones a problemas comunes con otros profesores que compartan las mismas inquietudes.

El surgimiento de enfoques teóricos adecuados al entorno que crea y ofrece internet, como el Conectivismo (Simmens, 2006) y las didácticas asociadas como Entornos personales de aprendizaje (PLE del inglés *Personal Learning Environment*), ofrecen elementos para configurar el diseño de estos sistemas de autocapacitación para los profesores.

1.1 El enfoque de capacitación docente de e-UAEM

La iniciativa de esta propuesta surgió a partir de las problemáticas manifestadas por los docentes de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) reportadas al área de soporte técnico de e-UAEM (el campus virtual de la UAEM), relacionadas con el manejo de la plataforma institucional, la cual utilizan para impartir una o varias materias en las modalidades híbrida o virtual (*e-Learning*).

Cabe mencionar que estos docentes ya han sido capacitados en el uso de la plataforma Moodle (el AVA institucional) y han recibido formación previa como Asesores en Línea por parte de e-UAEM, pero aun con esta capacitación, continúan manifestando dificultades durante la impartición de sus materias en e-modalidades.

Para que un docente de la UAEM pueda obtener una constancia que lo acredite como asesor en línea e impartir una materia híbrida o virtual en esta Universidad, deberá aprobar el curso de Asesoría en Línea, en el cual ejercitará el seguimiento a estudiantes ficticios en temas como: calificar actividades, configurar fechas de actividades y enviar mensajes a los estudiantes de manera individual y grupal.

ISSN en trámite

Para capacitar en el montaje y diseño de una asignatura, los docentes participan en los cursos: A. Diseño y Producción de Material Formacional para Ambientes Virtuales de Aprendizaje y B. Montaje y Edición en Moodle. En el primero el docente, con acompañamiento de un experto, desarrolla el diseño instruccional; en el segundo el diseño se monta en el LMS utilizando los recursos que éste brinda.

Ante el alta de manda para capacitar a estudiantes que cursan las asignaturas virtuales, e-UAEM implementó un curso de Inducción a la Formación Multimodal, en formato de curso autoadministrado, éste permitió capacitar a 2549 estudiantes solo en 2019. Con base en estos resultados se considera que este formato de curso autoadministrado permitirá capacitar hasta un 50% de la población docente de la UAEM, en temas técnicos, en un tiempo corto.

En este trabajo se propone el diseño de un curso autoadministrado, en línea y accesible a cualquier profesor de la UAEM. El objetivo del curso es que los profesores dominen los recursos que ofrece el AVA institucional, relacionados con habilidades pedagógicas y de comunicación que aún no logran consolidar algunos docentes. Con base en el dominio de estas habilidades se espera sean capaces de desarrollar y gestionar mejor un curso o materia en las modalidades híbrida o virtual.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Las competencias digitales

La formación docente es un tema importante a nivel internacional. Se afirma que los docentes deberían mantenerse bajo una formación que les permita generar competencias necesarias para el uso de las TIC (Llivina Lavigne y Urrutia, 2013). Incluso, en el Programa y presupuesto aprobado 2014 y 2017 de la UNESCO (2014), se especifica en el Objetivo estratégico 1, el "promover las TIC en la educación y nuevas modalidades de aprendizaje para mejorar el acceso al conocimiento, facilitar su difusión y lograr un aprendizaje más eficaz a lo largo de toda la vida" (p. 21).

En los estándares del Marco Común de Competencia Digital 2017, para la Unión Europea, la formación docente en TIC debería tener presencia tanto en la formación inicial como en la formación continua (INTEF, 2017). También, en el documento Marco de competencias docentes en materia de TIC (UNESCO, 2019) se considera a éstas como herramientas para guiar la formación inicial y permanente de los docentes acerca del uso de las TIC en todo el sistema educativo.

Finalmente, el Ministerio de Educación Nacional de Colombia, sintetiza las propuestas de los documentos descritos, en cinco competencias: Tecnológica, Comunicativa, Pedagógica, Investigativa y de Gestión, que los docentes deben desarrollar para la innovación educativa con el uso de las TIC. También se definen tres grados de complejidad (Exploración, Integración e Innovación) para el desarrollo de éstas (MEN, 2013).

2.2 La capacitación docente en TIC

La formación docente inicial y continua debe incluir una actualización constante en los usos de las TIC, puesto que ellas mismas están en un estado constante de evolución. Alvarado (2020) reafirma la necesidad de una capacitación tecnológica en todos los docentes. Propone un programa de trabajo en pares, generando un ambiente motivador y de confianza, así mismo sugiere proyectos de innovación educativa en donde converjan las TIC en los distintos temas de capacitación.

Por su parte Torelló (2011) señala que la formación docente no debe caer en la unificación de prácticas docentes (modelos, estrategias, metodologías utilizadas), esto porque no todas las áreas de conocimiento se abordan de la misma manera y no todos los profesores cuentan con el mismo nivel en las distintas competencias y en la gestión de metodologías, ni se sienten igual de cómodos desarrollando determinadas prácticas.

2.3 Los cursos autogestionados y la capacitación docente

Las iniciativas de los cursos autogestionados para formar a los docentes no es una idea nueva, aún sin el uso de TIC se han reportado este tipo de trabajos (Soliani, Hermosilla, Angelinos, Barrios y Torres, 2008). Otros trabajos han estudiado las diferencias en los resultados de los profesores, ante cursos autogestionados y cursos convencionales (Rusell, Kleiman, Carey y Douglas, 2009) en el área de matemáticas, en los que no encontraron diferencias significativas a partir de las cuatro condiciones de comparación entre cursos.

En el estudio realizado por Hertz, et al (2021) se indica que "Los cursos presenciales con oportunidades de aprendizaje entre pares siguen siendo populares, pero exigen tiempo y no son económicamente rentables para llegar a un gran número de docentes, ni han sido viables por las restricciones de la pandemia" (p. 145).

El surgimiento de paradigmas de aprendizaje asociados con Internet, como el caso del Conectivismo (Simmens, 2006), ha dado paso a prácticas autoformativas a través de didácticas específicas tales como los Entornos Personales de Aprendizaje (Vallín, 2012), cuyos principios se utilizarán como base para el diseño del curso autogestionado que se presenta en este trabajo.

2.4 Entornos personales de aprendizaje

Los Entornos Personales de Aprendizaje (PLE, por sus siglas en Inglés de *Personal Learning Environment*) son sistemas que ayudan a los estudiantes a tomar el control y gestión de su propio aprendizaje. Incluye el apoyo para fijar sus propios objetivos de aprendizaje, gestionarlo, gestionar los contenidos y procesos, comunicarse con pares y expertos para lograr los objetivos de

ISSN en trámite

aprendizaje. Un PLE puede estar compuesto de uno o varios subsistemas, Castañada y Adell (2013) consideran que un PLE tiene tres partes: a) las herramientas que uno elige para su aprendizaje; b) los recursos o fuentes de información y c) la Red personal de aprendizaje (PLN del inglés Personal Learning Network) que cada uno va construyendo. Estos principios orientan el diseño del curso autogestionado.

3. METODOLOGÍA

Para identificar las competencias y habilidades requeridas por parte de los profesores, y con ello diseñar el curso autogestionado, se realizaron diferentes actividades, articuladas con el carácter exploratorio de este trabajo, las cuales son:

Se analizaron los resultados de la *Encuesta docente a un año de la Jornada nacional de sana distancia* aplicada por la Secretaría académica de la UAEM a 1233 profesores (del 21 al 31 de mayo de 2021), parte de la cual diagnosticaba los requerimientos de formación docente y tipos de apoyo requeridos para desarrollar asignaturas en modalidad virtual. Para complementar ésta se aplicó una segunda encuesta a una muestra por conveniencia de 32 profesores con experiencia en cursos en modalidades online, para determinar sus enfoques teóricos y prácticos utilizados en la impartición de sus cursos e-*Learning* e híbridos y las problemáticas surgidas durante su operación (Moreno, 2022).

Finalmente, con base en una muestra de 65 correos electrónicos enviados por profesores al área de soporte técnico de e-UAEM (enero-junio 2021) se procedió a la identificación y definición de categorías susceptibles de informar sobre necesidades de capacitación (Moreno, 2022). Los datos obtenidos con los instrumentos se agruparon y analizaron con base en procedimientos de estadística descriptiva utilizando Excel y con ellos presentamos los siguientes resultados.

4. RESULTADOS

Con base en la información de la encuesta aplicada por la *Secretaría académica de la UAEM*, relacionada con el uso de las TIC, se observa que los profesores consideran el área didáctica como el más recurrente. El apoyo técnico para el uso de herramientas tecnológicas es 50 % menor al de didáctica y un 19% no específica el tipo de capacitación que requeriría (Fig. 1).

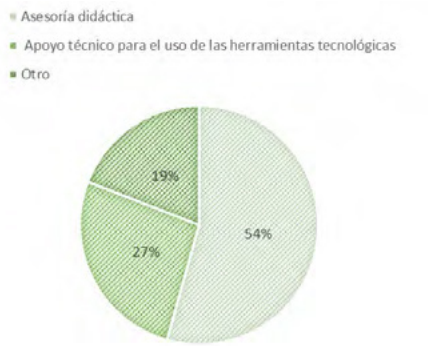


Fig. 1. Áreas identificadas como requerimientos de capacitación con base en las respuestas de los profesores.

Contradictoriamente con lo que se presenta en la Figura 1, donde los profesores solicitan mayor capacitación didáctica, en la segunda encuesta, en la sección sobre los ámbitos en los cuales han presentado mayores problemáticas al transformar su actividad docente a un ambiente virtual (Fig. 2), son los requerimientos en el ámbito tecnológico los que presentan mayor recurrencia (38%); las problemáticas pedagógicas representan 18 % y las sobrepasan los problemas socioafectivos y de logística (23 y 21 % respectivamente).

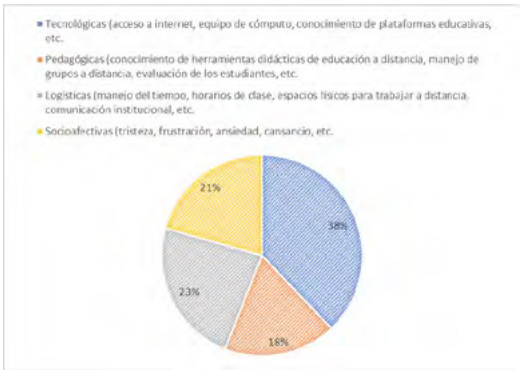


Fig. 2 Problemáticas a las que se enfrenta un docente al transformar sus actividades a una modalidad virtual.

Finalmente, con base en el análisis de los temas expresados por los profesores en sus solicitudes de ayuda se definieron cuatro categorías de ayuda relacionadas directamente con el AVA institucional: a) configuración de calificaciones; b) visualización de curso y/o actividad; c) configuración de curso y d) configuración de actividades y recursos (Fig. 3).

ISSN en trámite

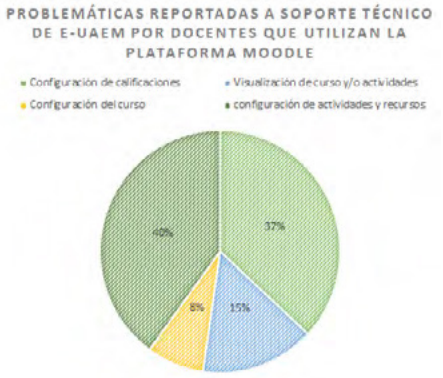


Fig 3. Distribución por categorías de las solicitudes de ayuda de los profesores a e-UAEM.

Con base en estos resultados es posible identificar estos requerimientos expresados por los profesores con algunas categorías de la Competencia digital docente (INTEF, 2017), aunque no sea posible – por el tipo de estudio – realizar recomendaciones específicas para los docentes ni asignarles un nivel específico de competencia.

Algunas de las competencias clave que resultan del análisis y que requieren de apoyo para que los profesores puedan desarrollarlas o perfeccionarlas son:

Resuelve problemas técnicos: el docente logra identificar y resolver problemas que son considerados de carácter técnico, por ejemplo: la configuración general de un curso, así como las actividades y recursos contenidos en él.

Identifica necesidades y respuestas tecnológicas: el docente identifica las herramientas más adecuadas para las actividades y recursos que implementa en busca de mejorar el aprendizaje de sus estudiantes, logrando la integración de éstas en el ámbito pedagógico.

Comunica asertivamente: al utilizar herramientas digitales el profesor establece contacto y se relaciona con sus estudiantes y mejora sus habilidades de expresión al utilizar diferentes medios y tipos de lenguaje.

Con base en los resultados y la consideración de las competencias digitales clave que los profesores requieren desarrollar se explicitan los términos que componen la problemática a la que el curso diseñado se propone como una posible solución:

Los profesores, aun los que ya cursaron el diplomado de e-UAEM, siguen teniendo problemas en el montaje y operación de sus cursos. El tipo de problemáticas reportadas son tres: a) técnicas, esto es, requieren profundizar o manejar adecuadamente las actividades y recursos de Moodle; b) pedagógicas, necesitan orientación - dependiendo de su área de especialidad - para la elección de recursos que faciliten el diseño de actividades y el seguimiento de éstas durante el curso y c) de comunicación, lo que implica manejar las herramientas para la comunicación entre profesor y estudiantes (chat, foro, mensajería instantánea, seguimiento individualizado de los estudiantes, etc.) durante la operación de sus cursos.

Aunque estos elementos se incluyen en los cursos que actualmente se ofrecen en la formación estándar para el uso de la plataforma institucional de educación a distancia de la UAEM, se requiere mayor tiempo y dedicación individualizada para dominar estos temas, como las que ofrece los Entornos Personales de Aprendizaje.

5. DISEÑO DEL CURSO

Con base en los principios de la ingeniería de software, consideramos que los aspectos antes descritos corresponden a la definición de requerimientos para integrar la arquitectura del curso autogestionado que se instrumentará en el AVA institucional. Una vez definidos los requerimientos se explicitan los objetivos del diseño del curso, son los siguientes:

5.1 Objetivo general. Proporcionar a los docentes de la UAEM un espacio en el que se apoyaran para crear y operar cursos en modalidades virtuales y desarrollar las competencias tecnológicas, pedagógicas y de comunicación sugeridas por diversos autores e instituciones a nivel internacional.

Objetivos específicos. a) Orientar a los docentes en el enfoque pedagógico de los recursos y actividades para la selección adecuada de los mismos; b) Propiciar la autonomía técnica en el LMS institucional al dominar aspectos como: herramientas de edición de cursos; herramientas de gestión y seguimiento durante la implementación de un curso virtual y herramientas de comunicación asesor-alumno y c) Fomentar en los docentes la comunicación asertiva, a través de comunidades de aprendizaje colaborativo (Moreno, 2022).

5.2 Casos de uso

Para orientar el diseño del curso, procederemos como de si un sistema informático se tratara, por lo que se parte del análisis de los casos de uso, los cuales son:

Caso 1. El profesor, de forma autónoma y orientada por sus objetivos, conforme a los Entornos Personales de Aprendizaje (PLE), busca información específica dentro del curso para el diseño, creación y seguimiento de un curso en línea.

El docente accederá al curso autoadministrado, dentro del curso elegirá el tema de su interés, los contenidos dispuestos para la consulta estarán accesibles en todo momento (Fig. 4). Se cuenta con supervisión y, en su caso, apoyo por el soporte técnico de e-UAEM.

ISSN en trámite

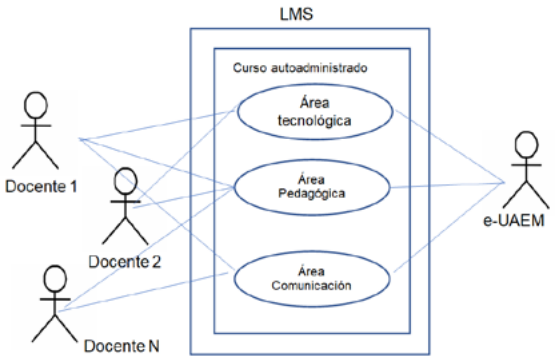


Fig. 4. Interacción del docente con los componentes del curso autoadministrado.

Caso 2. El profesor comparte experiencias que podrán ser de valor para otros docentes durante la creación o implementación de un curso en modalidad virtual. Al enfrentarse a una nueva situación, el docente podrá compartirla con el resto de los profesores participantes, colocando un nuevo tema que podrá ser respondido por otro docente que tenga alguna experiencia respecto al tema publicado o, en su defecto, será contestado por un experto en el área.

5.3 Arquitectura general del curso

El curso autogestionado denominado *"Capacita T"* se compone de tres módulos: I. Acceso y evaluación; II. Contenidos por categoría y III. Comunidad de práctica virtual.

I Acceso y evaluación. En éste además de verificar la identidad del profesor y su área de adscripción, en el primer acceso se aplicará un cuestionario de autodiagnóstico que le ayude a seleccionar las categorías de contenidos en las que más requiere apoyo.

II. Contenidos. Éste se dividirá en tres categorías: *tecnológica, pedagógica y de comunicación*. Y éstas se desglosarán en subcategorías: para la primera se presentarán temas como: configuración básica de una asignatura, selección y configuración de recursos para la generación de actividades y recurso, seguimiento de una asignatura durante su implementación. En la segunda los temas serían: creación de un guion instruccional, corrección de estilo, etc. y en la tercera se presentarán temas para mejorar el aspecto socioafectivo, la interacción con sus estudiantes y entre éstos.

III. Comunidad. Aunque es un curso autogestionado, con base en el enfoque de los Entornos Personales de aprendizaje, no se cierra la posibilidad de interactuar con pares, por lo que en este módulo, se compartirán experiencias y retroalimentación entre profesores que así lo consideren o puedan participar, para ello se generarán espacios dedicados y señalizados para la interacción entre profesores, pueden ser foros temáticos especializados (con base en las tres categorías antes señaladas), bases de datos de intercambio de información (artículos, apuntes, etc.) y blogs por áreas de especialidad (ciencias, biológicas, artes, etc.).

5.4 Diseño de interfaces

Cada módulo y sección del curso *"Capacita T"* estará conformada por N número de foros y demás recursos. En el caso de los foros contarán con una configuración que permita a los docentes incorporar nuevos temas de discusión.

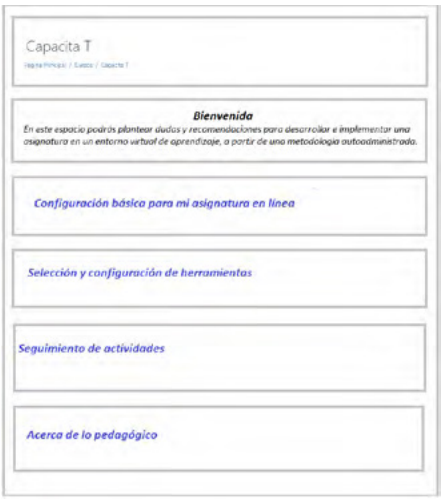


Fig. 5 Interfaz principal del curso

Para el diseño de los diferentes foros, la información contenida en las instrucciones se vinculará a tutoriales y documentación que facilite la comprensión de los temas para los docentes (Fig. 6).

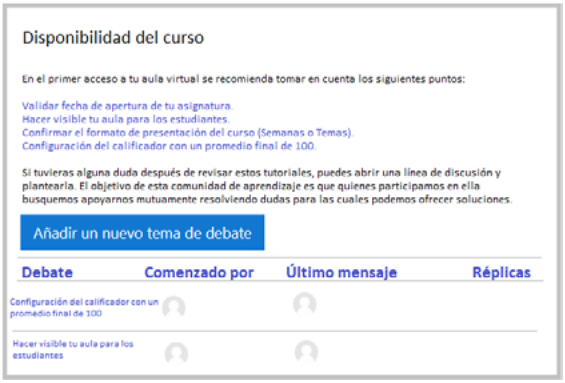


Fig. 6. Estructura de los foros de participación.

ISSN en trámite

5.5 Dinámica del curso para propiciar una red de aprendizaje personal (PLN)

Al finalizar cada tema se darán sugerencias al profesor para investigar nuevos, que permitan a los docentes explorar conceptos, enfoques y herramientas para mejorar su práctica docente *e-Learning* o híbrida. La idea es generar el interés genuino de los docentes como cuando al finalizar una película se presentan escenas post créditos y los fanáticos de los personajes después de verlos, están ansiosos por ver una nueva película. Este interés es el mismo que se espera tenga un profesor que desarrolla su propio Entorno Personal de Aprendizaje.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño de un curso autogestionado y sus fundamentos teóricos y empíricos. Al analizar los resultados de los cuestionarios y de las solicitudes de ayuda de los profesores al soporte técnico de e-UAEM, se observaron problemáticas similares a las expuestas por profesores experimentados tanto en el uso de un AVA como del diseño tecno pedagógico en cursos online de educación superior (Remesal, 2021). El diseño del curso autogestionado "Capacita T", se ofrece como una solución a la problemática institucional de atención personalizada a los profesores para su autocapacitación en competencias técnicas básicas.

El fundamento teórico del curso autogestionado se basa en los conceptos del enfoque de los Entornos Personales de Aprendizaje (Castañeda y Adell, 2013), fundados en el Conectivismo (Simmens, 2006), lo que sustenta la afirmación de que un curso de autoformación, como el diseño del aquí presentado, es una estrategia viable para la capacitación técnica de los profesores, en algunas de las competencias definidas por el INTEF (2017).

Queda pendiente la implementación y la práctica de este curso online, así como los instrumentos de evaluación de la experiencia de los docentes participantes con este tipo de curso.

REFERENCIAS

Alvarado, E. (2020). *La formación tecno-pedagógica de los profesores universitarios de lengua extranjera*. Revista Lengua y Cultura. 2. (1), 58-63.

Castañeda, L. y Adell, G. (2013). La anatomía de los PLEs. En Castañeda, L. y Adell, J. (Eds.). (2013). *Entornos Personales de Aprendizaje: claves para el ecosistema educativo en red.* Alcoy: Marfil.

Hertz, B., Grainge, H., Tasic, D., Laurillard, D., Murray, M., Fernández, L., Gilleran, A, Rojas, D. y Rutkauskiene, D. (2021). A pedagogical model for effective online teacher professional development-findigns from the Teacher Academy initiative of the European Commision. *European Journal of Education*. 57,142–159.

Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y Formación del profesorado (INTEF). (Ed.) (2017). Marco Común de Competencia Digital Docente. INTEF, 72 pp.

Llivina Lavigne, M. J. y Urrutia, I. (2013) La formación de un docente de calidad para el desarrollo sostenible. La Habana: UNESCO.

Ministerio de Educación, Colombia. (2013). *Competencias TIC para el desarrollo profesional del docente*. Colombia Aprende.

Moreno, M. (2022) *Formación docente en ambientes virtuales de aprendizaje: una propuesta para la adquisición de competencias clave*. Maestría en Gestión del Aprendizaje en Ambientes Virtuales UDG. Tesis de maestría.

Russell, M., y Klelman, G. (2009). Comparing Self-Paced and Cohort-Based Online Courses for Teachers. *JRTE*, 41(4), 443-466.

Simmens, G. (2004). Connectivism: a learning theory for the digital age. Retrieved 16 March 2022, from https://jotamac.typepad.com/jotamacs_weblog/files/Connectivism.pdf

Secretaría Académica UAEM. (2021) Encuesta docente a un año de la Jornada Nacional de Sana Distancia. Documento interno. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Soliani, E., Hermosilla, P., Angelino, L. y Torres, A. (2008). Una experiencia de autocapacitación docente. Proyecto "El conocimiento y la capacitación como construcciones autogestionadas". *Revista iberoamericana de educación*. 3. (47), 1-15.

Remesal, A. (2020) Sobrevivir a Moodle. Ideas lógicas para un uso eficiente y ergonómico del Campus Virtual. Dept. Cognición, Desarrollo y Psicología de la Educación Universidad de Barcelona.

Torelló, Ó. (2011). *El profesor universitario: sus competencias y formación*. Profesorado: Revista de curriculum y formación del profesorado. 3. (15), 195-211

UNESCO. (2014). Enseñanza y aprendizaje: Lograr la calidad para todos. Global Education Monitoring Report. https://unesdoc.unesco.org/. https://es.unesco.org/gem-report/node/259

UNESCO (2019). *Marco de competencias de los docentes en materia de TIC UNESCO*. Paris, France: UNESCO.

Vallín, M. (2012). *Hacia la autoformación permanente de los docentes en las comunidades de práctica: los talleres de internet en el aula, un modelo factible de formación*. TFM Investigación en Comunicación Digital Interactiva. Universidad de Vic.

ISSN en trámite

Educación a distancia de emergencia en el posgrado de ingeniería: competencias digitales utilizadas por profesores

Manuel Juárez Pacheco*. José Luis Rodríguez Pliego.**

** TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, DDAeI. DDAeI. Int. Internado Palmira. Cuernavaca, México. C.P. 62490. (e-mail: manuel.jp@cenidet.tecnm.mx.)*
*** Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Reforma 113. Col. Palmira. Cuernavaca, México. C.P. 62490. (jose.luis.rodriguez@ineel.mx)*

Resumen: A nivel mundial, excepto algunos países (por ejemplo: Uruguay), los sistemas educativos no estaban preparados para enfrentar los retos educativos surgidos por la pandemia de la Covid 19. Las Instituciones de Educación Superior buscaron conocer cómo sus profesores enfrentaron estos retos para establecer políticas institucionales de apoyo. La mayor parte de los estudios se enfocaron en los niveles de educación básica y hasta el nivel de licenciatura, pocos estudios se realizaron para el posgrado. Basado en el enfoque de las Competencias digitales docentes del INTEF, se realizó un estudio exploratorio, aplicando un cuestionario online a profesores de tres áreas de posgrado en ingeniería, con la finalidad de conocer las competencias digitales utilizadas durante la conversión de sus clases presenciales a la modalidad de *Educación a distancia de emergencia* e identificar áreas que requieren apoyo en sus actividades online. Los resultados describen las necesidades en habilidades pedagógicas y de uso de TIC.

Palabras clave: Competencias digitales docentes, Educación a distancia de emergencia, TIC, Formación de profesores, Educación superior, Posgrado.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la pandemia ha ocasionado un impacto global. Teixeira (2020) considera que, ante la nueva normalidad en la educación, las Instituciones de Educación Superior (IES) se dirigen a la multimodalidad (b-Learning, e-Learning e híbrido) por lo cual deben realizar mejoras en función de un aprendizaje flexible y transformar las formas de enseñanza-aprendizaje.

Aún antes de la pandemia se consideraba que el actual modelo de las universidades debía transformarse e incluso desaparecer, desde el punto de vista de algunos autores (Facer, 2011. Citado por Teixeira, 2020), para enfrentar los retos del aumento de la población demandante de educación superior y, sobre todo, por el aumento del uso de las Tecnologías de la Información (TI) como base de los procesos de educación formal y no formal.

Con el brote del COVID-19 se generalizó la impartición de clases a distancia y como punto de apoyo la utilización de las TI, que fungen como un medio para la comunicación y la gestión de una clase.

El quehacer docente de la modalidad presencial ya se veía cuestionado por algunas carencias tales como: la insuficiente formación en el campo docente y el desconocimiento de estrategias o conceptos pedagógicos y ahora se le exigirán y cuestionarán más aspectos relacionados con los nuevos medios y el desarrollo de competencias.

La pandemia limitó el trabajo directo entre profesores y estudiantes con fuerte impacto en las instituciones y en estos mismos actores. Se ha identificado desconcierto en el profesor por la adaptación de su hogar como aula y es que pasar súbitamente de una educación presencial a una a distancia se vuelve complejo, ya que se utilizó la tecnología en el proceso educativo sin capacitación previa (Delgado, 2020).

Las habilidades docentes para el desarrollo de cursos a distancia en esta contingencia no fueron óptimas, los profesores utilizaron las herramientas que tenían a su alcance, aunque sin evaluar su adaptación o si eran adaptables para el diseño e implementación de sus cursos online y la conectividad con su grupo de estudiantes, esto es, han hecho lo que actualmente se conoce como enseñanza remota de emergencia o, dicho de otro modo, educación a distancia de emergencia (Ibáñez, 2020).

Hodges, Moore, Lockee, Trust y Bond (2020) consideran que la estructura y la terminología del e-Learning no se ha comprendido lo suficiente, lo que provoca el que no se diseñe de forma adecuada un curso en línea y se opte por lo que se tiene al alcance haciendo la enseñanza remota de emergencia en lugar de un aprendizaje en línea, el cual debe ser efectivo y resultado de un cuidadoso diseño y planificación de la instrucción.

Esta modalidad de enseñanza remota de emergencia fue una respuesta a corto plazo (McMurtrie, 2020), que los profesores

ISSN en trámite

tuvieron que adoptar para responder a las condiciones que se presentan por la pandemia, sin embargo, aunque se han realizado estudios sobre cómo respondieron los profesores a esta modalidad, aun poco se conoce sobre las necesidades de los profesores con relación a las llamadas competencias digitales docentes (INTEF, 2017) y qué de éstas desarrollaron a partir de la práctica docente en esta modalidad emergente.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Estudios sobre la práctica de los docentes durante la pandemia

En todos los niveles educativos se desarrollaron estudios sobre el conocimiento de los profesores sobre las herramientas TIC (Sánchez M.; Martínez, Torres, De Agüero, Hernández, Benavides, Jaimes y Rendón, 2020; Zhao, Pinto, Sánchez y Zhao, 2021), aunque más que sobre la corrección de su uso didáctico, en general se enfocaron sobre el conocimiento técnico de los medios utilizados. Sin embargo, algunos otros estudios se han desarrollado a escala mundial sobre lo que desde hace algunos años se ha denominado "Competencia digital" de los profesores (DIGICOM, 2017).

2.2 La competencia digital docente

La definición sobre competencias digitales de los profesores tiene ya una historia que se remonta al menos al año 2000. Muchas instituciones (ISTE, 2002; UNESCO, 2008) han hecho propuestas que se actualizan cada cierto tiempo por el desarrollo constante del sustrato tecnológico y por la mayor amplitud de uso que estas tecnologías han alcanzado, tanto en el gobierno digital, de salud y educación, como actualmente se ha vivido en este periodo de pandemia.

La definición de la competencia digital se ha utilizado como herramienta de referencia con el fin de identificar y describir las áreas y niveles a tener en cuenta en planes formativos de los profesores y con fines de diseño curricular en los diferentes niveles educativos (INTEF, 2017). La definición con la que se trabaja para desarrollar y especificar las áreas de la competencia digital para docentes, es la siguiente:

> el uso creativo, crítico y seguro de las tecnologías de información y comunicación para alcanzar los objetivos relacionados con el trabajo, la empleabilidad, el aprendizaje, el tiempo libre, la inclusión y participación en la sociedad. (Página 10).

Las dimensiones que describe el Marco Común (INTEF, 2017, p. 9-10) son cinco y aunque cada una son competencias específicas, no son estancas ni excluyentes, por lo que están interrelacionadas entre sí:

1. Información y alfabetización informacional.
2. Comunicación y colaboración.
3. Creación de contenido digital.
4. Seguridad.
5. Resolución de problemas.

Con base en ellas se definen 21 competencias y se establecen seis niveles competenciales progresivos: A1 Nivel básico, A2 Nivel básico, B1 Nivel intermedio, B2 Nivel intermedio, C1 Nivel avanzado, C2 Nivel avanzado. Cada nivel describe acciones concretas que el profesor realiza dentro de su aula y en general en el ámbito educativo.

2.3 Los instrumentos de reconocimiento de la competencia digital docente durante la pandemia

En la revisión realizada para este trabajo se encontraron dos perspectivas: una que se inició antes de la pandemia y ha desarrollado instrumentos estandarizados (Tourón, Martín, Navarro, Pradas e Iñigo 2018) basados en la definición de competencia digital docente del INTEF y otra, más extendida, que puede describirse como inventarios de las prácticas e instrumentos utilizados por los profesores durante su enseñanza remota de emergencia de algunas universidades públicas (ejemplos: Sánchez, Martínez, Torres, De Agüero, Hernández, Benavides, Jaimes y Rendón, 2020; Secretaría Académica UAEM, 2021). Una diferencia clave del enfoque de los cuestionarios es que mientras que los basado en la definición y dimensiones de la competencia digital docente son básicamente de autoevaluación, los de la segunda perspectiva tienen fines estadísticos y de políticas institucionales.

En el caso de este trabajo, inicialmente se analizó la posibilidad de utilizar el instrumento de autoevaluación de la competencia digital docente generado en la Unión Europea y posteriomente normalizado para México a través de la ANUIES (Comité ANUIES – TIC, 2021) con la aplicación masiva de dicho cuestionario a todos los profesores de las IES nacionales (El cuestionario sigue activo en esta dirección: https://competencias-metared.anuies.mx/). Si bien ese cuestionario es valioso, dadas sus características y amplitud (más de 50 reactivos en dos categorías de respuestas) no se ajustaba a las acciones de los profesores del Cenidet, por lo que a partir de los resultados de las evaluaciones de los estudiantes a los profesores en el semestre enero – junio de 2021 (Juárez, 2021) y del análisis de la práctica de algunos profesores de las áreas de Ingeniería Electrónica y Mecánica del Cenidet, se definió un enfoque que articula la identificación de las competencias digitales docentes y las herramientas utilizadas por los profesores en su Enseñanza remota de emergencia. El objetivo que se planteó para este cuestionario es indagar cómo se ha realizado la Enseñanza a distancia de emergencia por parte de los profesores de Cenidet, durante la pandemia del Covid 19, de tal manera que se integren políticas y programas institucionales de apoyo a los profesores en el desempeño de su trabajo en esta modalidad.

3. METODOLOGÍA

3.1 Profesores participantes

ISSN en trámite

Conforme a la naturaleza exploratoria de este trabajo, se procedió a definir la población a la que se le aplicaría el cuestionario, en total 62 profesores de las maestrías en Computación, Electrónica y Mecánica, del TecNM/Cenidet, a los cuales se les envió una invitación a participar y el enlace al cuestionario. Solo respondió el 40.32 % de los profesores invitados.

3.2 El cuestionario de reconocimiento de las competencias y prácticas de Enseñanza remota de emergencia

El cuestionario se integra por cinco secciones y 19 preguntas. La primera sección la forman tres preguntas que recopilan información para identificar al profesor y su adscripción institucional. La segunda sección incluye tres preguntas, dos cerradas y una abierta, exploran el conocimiento del profesor sobre las plataformas de educación a distancia y los servicios de teleconferencia, además se piden una cuantificación global del uso de videoconferencia en el conjunto de sus cursos. La tercera sección tiene una sola pregunta que sondea las herramientas digitales y convencionales que los profesores utilizaron en sus cursos. La cuarta sección comprende tres subsecciones: la primera explora los ajustes y dificultades para migrar a la nueva modalidad; la segunda indaga sobre la satisfacción con su curso y la percepción del profesor hacia sus estudiantes y, finalmente, la tercera invita a realizar un autodiagnóstico y reflexionar sobre lo aprendido para explorar su uso en cursos cara a cara y en otras modalidades de educación a distancia. Finalmente, la quinta sección contiene una pregunta abierta que permite expresar libremente opiniones, comentarios o recomendaciones sobre la temática del cuestionario.

3.3 Tratamiento de los datos

Puesto que el cuestionario utilizó la herramienta *Formularios* de Google Drive, se obtuvieron automáticamente los resúmenes agrupados por pregunta y el resumen general. Se generó una base de datos con la hoja de cálculo asociada, lo que permitió analizar las respuestas textuales de los profesores. Con base en este corpus de datos se realizó el análisis completo de las respuestas.

4. RESULTADOS

4.1 Conocimiento sobre plataformas y servicios de videoconferencia

En cuanto a plataformas de educación a distancia o *Learning Management Systems* (LMS) las cuatro más utilizadas fueron:

1. Classroom (50 % de los profesores de Mecánica; 82 % de los profesores de Electrónica y 62.5% de los profesores de computación);
2. Moodle (12.5% de los profesores de computación; 18.2% de los profesores de electrónica);
3. Blackboard (18.2% de los profesores de electrónica);
4. Teams (12.5% de los profesores de computación

Son destacables dos situaciones que surgieron y se relacionan con las competencias digitales.

- La primera es que algunos profesores de ciencias de la computación y de electrónica confunden una plataforma de aprendizaje a distancia, un LMS, con los servicios de videoconferencia.
- La segunda es que algunos profesores de mecánica (33%) dijeron no haber utilizado ninguna plataforma de educación a distancia y uno más, considera que “One Note”, una herramienta muy versátil del Microsoft Office, es también en sí misma un LMS, aunque en las respuestas posteriores se aclara que en realidad se utilizó como un pizarrón virtual.

Estas confusiones muestran carencias en el conocimiento de las herramientas básicas para el trabajo a distancia con sus estudiantes.

En cuanto a los servicios de videoconferencia, los dos más utilizados fueron Meet y Zoom, sea de forma única o la utilización de ambos. En el caso de Meet lo utilizaron: el 100% de los profesores del área de computación; el 81.8 % de electrónica y el 66.7% en mecánica. Con Zoom, tenemos que los profesores de computación solo lo utilizaron el 25 %, el 63.6 % los de electrónica y el 83 % los profesores de mecánica.

Finalmente, sobre el porcentaje promedio de utilización de la videoconferencia en sus cursos la tendencia es al 100% de forma global, aunque en algunos casos de los profesores de las áreas de electrónica y computación este promedio se reduce hasta el 80%, sin embargo, este porcentaje de utilización es alto (Juárez, 2021).

Una de las características de la Educación a distancia de emergencia es, justamente, la adaptación de la dinámica de las aulas presenciales en las sesiones de videoconferencia, esto es, se explota la sincronía y se utilizan poco las actividades asincrónicas que pueden desarrollar los estudiantes.

4.2 Herramientas utilizadas en los cursos

Puesto que la mayoría de los profesores usaron Classroom y videoconferencias para impartir sus cursos, la utilización de herramientas que complementaran o suplieran al LMS y dieran fluidez a los temas que desarrollaban en las videoconferencias fueron las que de forma natural adoptaron la mayoría de los profesores, con particularidades en el uso de software específico de cada área.

Google Drive fue utilizado por todos los profesores como repositorio, WhatsApp como medio de comunicación desplazó al correo electrónico y Power Point como herramienta para desarrollo de materiales (diapositivas o videos, etc) fue la más utilizada.

Aunque utilizaron Classroom y Drive es notable que no utilizaron el resto de las herramientas de la suite de Drive, con ellas sustituirían a la suite de Office y podrían utilizar apps adecuadas a sus cursos con la ventaja de trabajar desde y con el navegador (en especial Chrome).

ISSN en trámite

El uso preferencial de la videoconferencia creó la necesidad de utilizar un pizarron con el que mostrar expresiones matemáticas o gráficas, por lo que algunos de los profesores, de los tres programas de maestría, utilizaron un dispositivo físico: una tableta digitalizadora (aunque algunos usaron una tablet android o iOS o un smart phone) con software especializado como pizarra digital (Miró, Explaineverything, Openboard, Jupyter Notebook, Jamboard) o software genérico que al compartirlo en sus pantalla, les permitía expresar de mejor manera la notación matemática (Scientific Word, Editores de Latex, Mathlab Live) o mostrar gráficos (One Note).

En cuanto al software especializado los profesores de cada área utilizaron los que mejor se adaptaban a los requerimientos de sus cursos:

• En Computación: R, rStudio, Weka, Matlab y Python.

• En Electrónica: Scilab y Matlab.

• En Mecánica: Matlab, Scientific y Simnon.

Las herramientas que utilizaron en los tres programas son Latex y Matlab (Juárez, 2021).

4.3 Ajustes y dificultades en la Enseñanza remota de emergencia

A excepción de una profesora, que afirmó usar Classroom desde antes de la pandemia de manera regular en sus cursos, el resto de los profesores mostraron un gran esfuerzo en la concreción de sus cursos en esta modalidad emergente.

Puesto que las áreas, las propuestas y el tipo de curso (teórico o con laboratorios) eran diferentes, el tipo de ajustes que requirieron hacer los profesores y las dificultades que enfrentaron fueron también diferentes, sin embargo, tanto ajustes como dificultades se pueden agrupar en cinco categorías: a) didácticas; b) de interacción con los estudiantes; c) técnicas; d) evaluación y e) de tiempo. A continuación, se agrupan algunos de los ajustes y dificultades expresados en cada rubro.

a) Didácticas. En este rubro se incluyeron aspectos como el diseño instruccional, la definición de actividades: preparación de ejercicios, ejemplos y demostraciones. Determinar el número adecuado de ejercicios.

El desarrollo de recursos didácticos, desde desarrollar programas y automatizar ejemplos de refuerzo hasta preparar y mejorar presentaciones (más explicativas, atractivas). Además, requirió la elección de videos en internet ajustados a sus cursos. Uno de los grandes retos de los cursos que incluían laboratorio fue el uso solo de simulaciones, sin laboratorio físico.

Por otro lado, y con relación al medio utilizado, uno de los ajustes más importantes fue el "Hacer dinámica la videoconferencia, que no fuera un monologo" y la dificultad de la evaluación formativa, ante la imposibilidad de "Observar la realización de cálculos por parte de los estudiantes".

b) Interacción con los estudiantes. Aunque la interacción con y entre los estudiantes es también una cuestión del diseño instruccional, el señalamiento de los profesores sobre las dificultades de la modalidad para interactuar como lo hacen en un aula convencional, motivó a que los profesores realizaran actividades de "demostraciones e interacción en el desarrollo de programas en Matlab" con la finalidad de restablecer la posibilidad de retroalimentar durante el proceso.

Otras cuestiones de interacción durante la videoconferencia tienen matices afectivos y de la retroalimentación no verbal que los estudiantes dan a los profesores en las aulas, por lo que "no ver el rostro de mis estudiantes durante la impartición del curso" y "La limitada capacidad de comunicación no verbal de esta modalidad" fue una de las principales dificultades. Aunque la retroalimentación no verbal de los estudiantes no era solo una cuestión social, los profesores identifican la necesidad de la comunicación como una forma de "hacer que la comprensión se llevara a cabo", esto es, verificar el avance de sus estudiantes en la comprensión del tema.

c) Técnicas. En cuanto a los ajustes y dificultades, en este rubro es más difícil desligarlo de los conocimientos y el uso de la tecnología de cada profesor, así tenemos afirmaciones de profesores que consideran una dificultad "usar classroom" y afirmaciones que van dirigidos al dominio de un software específico, por ejemplo: "el uso de software especializado (Scientific Work Place)" o de una función en específico, "incluir audio en presentaciones de Power Point" y "Sincronizar el audio con la imagen".

Algunos otros consideran que uno de sus ajustes fue "Usar tableta digitalizadora" y una dificultad "Utilizar pizarras interactivas" o "No contar con un pizarrón electrónico". Finalmente, hay algunas afirmaciones como "Digitalizar textos" que puede tener significados diversos: cuenta con un escáner y sabe cómo usarlo. Otras, en cambio, escapan al control de profesores y estudiantes, sin dejar de ser por supuesto, una dificultad: "la intermitencia en el servicio de internet de los estudiantes".

d) Evaluación. Solo dos profesores explicitaron los ajustes y las dificultades para evaluar a sus estudiantes en esta modalidad, el ajuste fue "generar exámenes individualizados" y "Generar exámenes de acuerdo al medio y la situación a distancia" que en la sencillez de la afirmación se oculta una reflexión profunda sobre las diferencias entre esta modalidad y la modalidad presencial, y el cómo valorar adecuadamente el avance de los estudiantes. La dificultad se relaciona con la solución dada, se requiere también una "Revisión de exámenes individualizados", que, aunque fuera con pocos estudiantes, la revisión implica invertir tiempo.

e) Temporales. Los profesores descubrieron que, en esta modalidad a distancia, sin una planificación adecuada, implica "más sesiones para cubrir el curso". Y en general como antes se vio cualquier acción que implique un resultado individual como la "Revisión de exámenes individualizados" implica invertir

ISSN en trámite

tiempo. Lo mismo pasa en el desarrollo de materiales didácticos adecuados al medio, por ejemplo, la "Complejidad de la realización de presentaciones con alta carga matemática", implica mayor inversión en tiempo que el que podría tomarse en una situación presencial.

4.4 Autodiagnóstico y visión de futuro

Después de responder a preguntas que indagaron sobre varios aspectos de su actividad como docentes online, se esperaba una reflexión más profunda sobre las necesidades identificadas en dicha práctica, sin embargo, sus reflexiones no fueron más profundas ni se centraron solo en cuestiones de uso de tecnología, más bien – y dependiendo del área – ampliaron el espectro a cuestiones asimilables al diseño instruccional y a utilizar herramientas para motivar o involucrar a sus estudiantes (tabla 1).

Tabla 1. Necesidades detectadas por los profesores para mejorar su práctica online

Necesidades		Computación	Electrónica	Mecánica	Total
Saber	Simuladores			1	1
	Programación			1	1
Usar	Pizarrón virtual			1	1
	Interacción sincrónica (tableta)		2	1	3
	Otros LMS	1			1
Hacer	Diseño instruccional	2	3		5
	Material interactivo	1		1	2
	Videos		1		1
	Presentaciones		1		1
	Exámenes a distancia		2		2
Perfeccionar	Uso de Meet	1			1
	No identifica	1	1		2
	Nada		1	1	2
	Totales	6	11	6	23

En la tabla 1 se muestran las cuatro categorías de necesidades que se pueden observar en las respuestas de los profesores: Saber, Usar, Hacer y Perfeccionar. Aun cuando se requiere mayor contexto y explicación sobre el significado que hacen los profesores de mecánica sobre el conocimiento de simuladores y la programación, se infiere que sus cursos se benefician si los profesores amplían sus conocimientos en estas dos áreas.

El perfeccionamiento en el uso de Meet (o de Zoom) se relaciona con la necesidad de aprender a usar herramientas que posibiliten la interacción sincrónica o la generación de explicaciones del profesor al estudiante en una videoconferencia, utilizando un software (Jamboard, Open board, Explaineverithing, etc.) como pizarra digital compartida y un hardware (tableta digitalizadora, tablet o smarthphones) que faciliten la escritura del lenguaje matemático o de aspectos gráficos requeridos en el curso. Usar también hace referencia al uso de otras plataformas de educación a distancia.

La categoría en la que se observan más respuestas de los profesores es en "Hacer". Esta categoría en las respuestas de los profesores tiene dos dimensiones, una completamente instrumental: se requiere dominar herramientas para crear material interactivo, videos y presentaciones. No se especifica qué es lo que se debe entender por material interactivo. Y otra más conceptual y más amplia: el diseño intruccional de los cursos a distancia. Esta dimensión resultó la qué más profesores, de dos de las tres áreas de maestría, reconocen como una necesidad.

Finalmente, dos profesores afirman que no requieren aprender nada más y dos profesores no identifican aún, que es lo que les haría falta aprender.

Sobre la visión del futuro de la utilización de sus materiales en cursos presenciales, 10 profesores de las áreas de electrónica y computación, enfáticamente consideran que utilizarán todo lo desarrollado para esta modalidad en la modalidad presencial. Por el contrario, un profesor del área de Mecánica afirma que no utilizará nada de lo desarrollado en esta modalidad.

El tipo de material que siete profesores de las tres áreas consideran retomarán en sus futuros cursos presenciales, son las presentaciones en Power Point, seguidos por los apuntes en pdf, el uso de tabletas digitalizadoras, pizarrones virtuales, videos con explicaciones y el uso de Classroom.

La preferencia por las diapositivas se explica por el desconocimiento sobre las actividades asíncronas que incluye la modalidad de e-Learning, pero no la enseñanza a distancia de emergencia. Por otro lado, el uso de Classroom está indicado para la modalidad b-Learning, más que para la modalidad e-Learning, por lo que incorporarlo a sus clases presenciales es adecuado.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados de una encuesta aplicada a profesores de posgrado en ingeniería, sobre las herramientas utilizadas y dificultades enfrentadas en su paso de los cursos presenciales a los de Enseñanza remota de emergencia.

A partir de los resultados se obtienen los fundamentos para el desarrollo de políticas y programas de formación sobre competencias digitales dentro de la institución y es posible identificar el nivel general que los profesores encuestados presentan sobre las competencias digitales docentes.

De las cinco categorías y 20 subcategorías con los que se fijan los niveles de competencia digital docente, del nivel básico (A1) al avanzado (C2) (INTEF, 2017), las tres primeras son aplicaciones específicas (Información y alfabetización informacional; Comunicación y Colaboración y Creación de contenido digital) y las dos finales son transversales (Seguridad y resolución de problemas). Las respuestas dadas por los profesores se agruparon en las tres primeras competencias y prácticamente no reportaron algo relacionado con las dos últimas. De las respuestas a las tres primeras se centraron más

ISSN en trámite

en la parte de comunicación y colaboración, pero sin apartarse de herramientas básicas y dejaron de lado aspectos de ciudadanía digital y Netiqueta. La otra agrupación de respuestas recae sobre la tercera competencia: *Creación de contenido digital*, en donde reconocen carencias en el uso de instrumentos para producirlos. Por lo que podríamos asignar un nivel B1 de la competencia digital docente al grupo encuestado, aunque es altamente recomendable que los profesores respondieran al cuestionario de autodiagnóstico.

Con base en lo antes descrito se identifican las siguientes áreas que requieren reforzarse para avanzar a un mayor nivel de competencia digital docente:

A. Diseño tecno-pedagógico para cursos e-Learning y b-Learning.

B. Dominio de las plataformas para educación a distancia (Classroom y/o Moodle).

C. Manejo de herramientas para creación de materiales interactivos.

D. Utilización de herramientas para mejorar la interacción durante las videoconferencias.

E. Ampliación de la cultura digital contemporánea (Ciudadanía digital, seguridad informática, netiqueta, etc.)

Quedan pendientes los mecanismos y procesos que deberá desarrollar la institución, para concretar políticas institucionales y programas académicos de apoyo para mejorar las competencias digitales.

REFERENCIAS

Delgado, P. (October 26, 2020). La capacitación docente, el gran reto de la educación en línea. Observatorio de la Educación ITESM. https://observatorio.tec.mx/edu-news/capacitacion-docente-covid

Hertz, B., Grainge, H., Tasic, D., Laurillard, D., Murray, M., Fernández, L., Gilleran, A, Rojas, D. y Rutkauskiene, D. (2021). A pedagogical model for effective online teacher professional development-findigns from the Teacher Academy initiative of the European Commision. *European Journal of Education*. 57,142–159.

Hodges C., Moore S., Lockee B., Trust T. y Bond A. (2020) La diferencia entre la enseñanza remota de emergencia y el aprendizaje en línea. EDUCASE review. Consultado el 25 marzo 2022. Recuperado de: https://er.educause.edu/articles/2020/3/the-difference-between-emergency-remote-teaching-and-online-learning

Ibáñez, F. (2020). Educación en línea, Virtual, a Distancia y Remota de Emergencia, ¿cuáles son sus características y diferencias? Tecnológico de Monterrey. Observatorio de Innovación Educativa. Consultado el 25 marzo 2022. Recuperado de: https://observatorio.tec.mx/edu-news/diferencias-educacion-online-virtual-a-distancia-remota

Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y Formación del profesorado (INTEF). (Ed.) (2017). Marco Común de Competencia Digital Docente. INTEF, 72 pp.

ISTE (2002): National Educational Technology Standards for Teachers: Preparing Teachers to Use Technology. Eugene, OR: ISTE

Juárez, M. (2021) Reporte de los resultados de la aplicación del cuestionario: "Necesidades de formación en competencias digitales de los profesores del cenidet". Documento interno. DDAeI. TecNM/CENIDET.

McMurtrie, B. (Coordinadora) (2020). From Emergency Remote Teaching to Effective Distance Education. The Chronicle of Higher Education. Webinar. [Archivo de video]. Recuperado de: https://www.chronicle.com/page/from-emergency-remote-teaching-to-effective-distance-education

Sánchez M.; Martínez, A.M.; Torres R.; De Agüero, M.; Hernández, A.; Benavides M., Jaimes,C. y Rendón, V. (2020). Retos educativos durante la pandemia de COVID-19: una encuesta a profesores de la UNAM. Revista Digital Universitaria

Schleicher, A. (2020) The Impact of Covid-19 on Education - Insights From Education at a Glance 2020 @Oecd 2020

Secretaría Académica UAEM. (2021) Encuesta docente a un año de la Jornada Nacional de Sana Distancia. Documento interno. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Suárez, J. M., Almerich, G., Belloch, C., & Orellana, N. (2010). Perfiles del profesorado a partir del conocimiento de los recursos tecnológicos y su relación con el uso que hacen de estas tecnologías. *Revista Complutense de Educación*, *21*(2), 247 - 269. Recuperado 24 de marzo de 2022, de https://revistas.ucm.es/index.php/RCED/article/view/RCED1010220247A

Sutiah, S., Slamet, S., Shafqat, A., & Supriyono, S. (2020). Implementation of distance learning during the covid-19 pandemic in faculty of education and teacher training. *Cypriot Journal of Educational Sciences*, *15*(5), 1204–1214. https://doi.org/10.18844/cjes.v15i5.5151

OCDE (2020). The impact of COVID-19 on education: insights from education at a glance 2020. Recuperado de: https://www.oecd.org/education/the-impact-of-covid-19-on-education-insights-education-at- a-glance-2020.pdf

Teixeira, A. (2020). Construyendo la universidad híbrida: retos, posibilidades y dilemas [Archivo de video]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=3GOubilhFT8&feature=youtu.be

Zhao, Y., Pinto A. M., Sánchez, M. C., & Zhao, L. (2021). The Impact of Gender and Years of Teaching Experience on College Teachers' Digital Competence: An Empirical Study on Teachers in Gansu Agricultural University. Sustainability, 13(8), 4163.

ISSN en trámite

MODELOS Y APLICACIÓN DE LEARNING ANALYTICS QUE USA DATOS ESCOLARES PARA PREDECIR EL RENDIMIENTO DE ALUMNOS

Valeria Saraí Avila Grajeola.* Leonardo Nevarez Chávez.**
Marisela Ivette Caldera Franco.* Gregorio Ronquillo Máynez**** Arturo Legarda Sáenz*******

** Alumna. Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II. (e-mail: mm14550658@chihuahua2.tecnm.mx)*
*** M.C. Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II. (e-mail: leonardo.nc@chihuahua2.tecnm.mx)*
**** Dr. Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II. (e-mail: marisela.cf@chihuahua2.tecnm.mx)*
***** Dr. Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II. (e-mail: gregorio.rm@chihuahua2.tecnm.mx)*
******M.C Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II. (e-mail: arturo.ls@chihuahua2.tecnm.mx)*

Resumen: Learning Analytics (LA) también conocida en español como la analítica de aprendizaje, es la encargada de utilizar datos sobre los estudiantes y su actividad en diversos contextos, para ayudar a comprender y mejorar los procesos de gestión educativa y, del mismo modo obtener de manera oportuna opciones para la mejora del aprendizaje de los propios alumnos. Este artículo pretende mostrar el desarrollo de modelos de LA para la predicción de calificaciones en alumnos con datos escolares, utilizando la metodología CRISP-DM y realizando modelos como: regresión simple, regresión múltiple y de agrupamiento con el método de K-Means.

Palabras clave: educación; analítica del aprendizaje; modelos de predicción; regresión; agrupamientos k-Means;

Abstract: Learning Analytics (LA) also known in Spanish as learning analytics is responsible for using data about students and their activity in various contexts, to help understand and improve educational management processes and, in the same way, obtain in a timely manner options for the improvement of the learning of the students themselves. This article aims to show the development of LA models for the prediction of grades in students with school data, using the CRISP-DM methodology and making models such as: simple regression, multiple regression and grouping with the K-Means method.

Keywords: education; learning analytics; prediction models; regression; k-Means groupings;

1. INTRODUCCIÓN

La digitalización se ha infiltrado en todos los aspectos de la vida cotidiana ya que las nuevas tecnologías emergentes tienen un impacto dentro de nuestras vidas, las cuales afectan y cambian la forma en que hacemos nuestro trabajo diario, elevando el desempeño a una nueva altura (Hassan et al., 2020).

Actualmente el cambio que se ha presentado dentro del aprendizaje tradicional, se ha trasladado hacia un modelo donde éste, puede tener lugar fuera del aula facilitando la obtención de los diferentes atributos del alumno como son: el aprendizaje virtual, verbal, auditivo, y en solitario, logrando el aprendizaje mixto (Hassan et al., 2020).

Es ahí donde se integra y utiliza a Learning Analytics (LA) o como se le conoce en español Analítica del Aprendizaje, desde un lado conceptual hasta los análisis e interpretaciones de los datos educativos, estos registros obtenidos de los diferentes sistemas de gestión del aprendizaje, como son foros de discusión, inicios de sesión, tiempos dentro de las plataformas, brindan una gran cantidad de información, la cual podrá ofrecer retroalimentación retroactiva a los alumnos o profesores a cargo; por ello, la relevancia éste artículo científico en el cual se muestra la creación de modelos de LA para la predicción de calificaciones de alumnos con datos escolares que posteriormente, con la información adecuada se pueden aplicar en la educación superior.

1.1 Objetivo, alcances y limitaciones

El objetivo principal del proyecto es la realización de modelos de LA, basados en información de *datasets* gratuitos con información escolar de alumnos para predecir el rendimiento y determinar a los que se encuentran en situación de riesgo académico.

Realizar una aplicación web, en donde se verán visualizados los modelos desarrollados y recursos de ayuda para profesores.

Pero como en toda investigación contamos con alcances y limitaciones, algunos de ellos son:

Alcances

- Contar con modelos de LA dentro del Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II.
- Visualizar dentro de una aplicación web, alumnos con posible riesgo académico.

ISSN en trámite

- Tener una educación focalizada en alumnos con riesgo de deserción escolar.

Limitaciones

- No contar con el acceso a los datos concretos del Tecnológico Nacional De México campus Chihuahua II.

1.2 Justificación y pregunta de investigación

Actualmente las escuelas tienen información socio-económicos de sus estudiantes como las calificaciones de materias y datos derivados del uso extensivo de los entornos virtuales de aprendizaje, entre otros.

Todos estos datos tienen el potencial de convertirse en información valiosa para la toma de decisiones y para anticiparse en el tiempo y así poder prevenir la deserción. Por tal motivo la importancia de este proyecto, surge de la necesidad de atender a tiempo a los estudiantes con riesgo académico, ya que no se cuenta con ningún modelo ni herramienta web dentro del tecnológico que estime el rendimiento de los estudiantes en los semestres consecutivos; la cual auxilia en la detección de alumnos en riesgo académico, asimismo que en un futuro próximo servirá de ayuda para la implementación y adaptación de los datos que se generan por parte del Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II.

Como aportación beneficiosa se crearán más modelos de LA como lo son: modelos de regresión lineal simple y múltiple, modelos de agrupamiento (clustering) con el método de K-Means y un modelo de predicción con redes neuronales; además de una aplicación web en donde se implementan dichos modelos para su visualización y uso por parte de los docentes y para que posteriormente se implementen los datos generados por el Tecnológico.

Es así que se define como pregunta de investigación a resolver:

- ¿Cómo predecir el rendimiento de los alumnos en situación de riesgo académico, para atenderlos a tiempo?

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

LA es un campo emergente en el que se utilizan sofisticadas herramientas analíticas para la mejora del aprendizaje y la educación. Se basa estrechamente en una serie de campos de estudio como son la inteligencia empresarial, análisis web, análisis académico, datos educativos, minería de datos y análisis de acciones (Elias, 2011).

Sin duda, las investigaciones no han parado ya que las exploraciones relacionadas con LA han tenido un gran desarrollo desde el año 2011, mostrando el desarrollo de métricas educativas centradas en la visualización y análisis de datos provenientes de distintas fuentes, todo dentro de un contexto creciente de presiones para la rendición de cuentas dentro de la educación superior (Berners-Lee, Hendler y Lassila, 2001 como se citó en Rojas-Castro).

Dentro de las experiencias de LA, estan las siguientes universidades: *Baylor University, University* de Alabama, Sinclair *Community College*, *Northern Arizona University*, o el célebre caso de la *Purdue University* y su programa llamado *Signals*, este es conocido como el pionero de la aplicación exitosa de LA en el cual, se logra rastrear el progreso académico de los estudiantes además de advertir a los mismos en tiempo real si necesitan trabajar en ciertas áreas. Este sistema cuenta con una amigable interfaz para el usuario la cual muestra su predicción por medio de luces (rojas, amarillas y verdes) parecidas a señales de tránsito; éstas son seguidas por mensajes del tutor o profesor brindando sugerencias como: asistir a sesiones de ayuda o leer materiales adicionales, con el fin de mejorar su rendimiento académico y aumentar sus calificaciones(ver figura 1) (Castro, 2016).



Figura 1. Pantalla Siglas desde navegador web.
Obtenido de: Signals: Applying Academic Analytics. (2010).

Otro de los trabajos que se tiene como antecedente es el trabajo de Martínez Bachmann (2017), éste presenta el proceso para predecir calificaciones de estudiantes en áreas específicas, mostrando el uso de algunos métodos como: regresiones simples, creaciones de gráficos con estadísticas básicas para el proceso de predicción.

De la investigación anterior, se consideran algunos datos que se utilizan dentro del proyecto que se está desarrollando, ya que por todo lo que se está viviendo en la actualidad con el COVID-19 no se pueden acceder a los datos que se obtienen directamente en el Tecnológico.

2.2 Metodología

Con el gran crecimiento que surgió dentro de la rama emergente de LA, se recomiendan metodologías centradas en la minería de datos.

Una metodología que emplea un enfoque sistemático para poder llevar a cabo el proceso, es la metodología CRISP-DM.

CRISP-DM (*Cross Industry Standard Process for Data Mining*). Es una metodología que fue creada por el grupo SPSS y Daimer Chryler en los años 2000. Proporciona una descripción

ISSN en trámite

normalizada del ciclo de vida de un proyecto estándar de análisis de datos (ver figura 2) de forma análoga como se hace en la ingeniería del software, y ayuda a cubrir las fases de un proyecto, dividendo en sub tareas y relaciones que tienen las mismas, la cual ayuda a la identificación de las relaciones que podrían existir entre las tareas según los objetivos, el contexto y el interés del usuario sobre los datos (Moine et al., 2011).

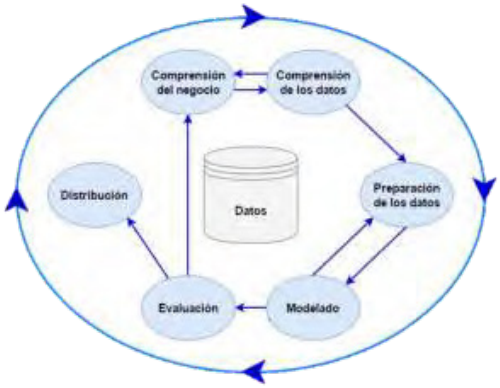


Figura 2. Ciclo de vida de la metodología CRISP-DM.
Obtenido de: CRIPS-DM: los 6 pasos del proceso de Data Mining - Blog Smartup. (2019).

Por todo lo que brinda esta metodología es la más adecuada para aplicar al proyecto que se está desarrollando ya que ayuda a dividir de manera óptima las tareas para posteriormente desarrollarlas, además de que es una de las metodologías más utilizadas dentro de los entornos de minería de datos.

En la figura 3 se muestra una encuesta de las metodologías más utilizadas.

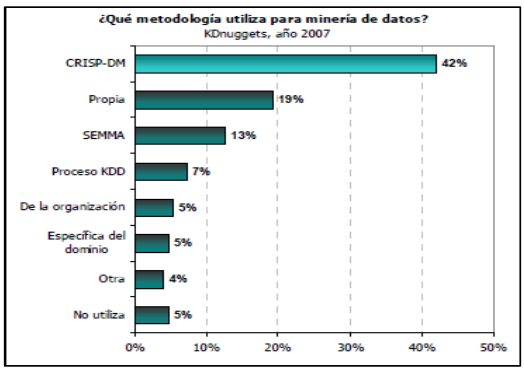


Figura 3. Encuesta realizada por Kdnuggets 2007 sobre metodologías con mayor porcentaje de utilidad
Obtenida de: Castro, P. R. (2016).

Una vez definida la metodología se comienza con el análisis de los datos, los cuales son obtenidos del proyecto de Martínez Bachmann (2017); el cual tiene una cantidad de 392 datos totales con 32 categorías principales algunos de los datos que contiene este *dataset* son:

- Calificaciones finales.
- Trabajo de la madre y el padre.
- Cantidad de tiempo libre
- Acceso a Internet.
- Razón por la cual eligieron esta escuela.
- Tiempo semanal de estudio.
- Actividades extracurriculares.
- Cantidad de tiempo que sale con los amigos
- Estado de salud.
- Consumo de alcohol.
- Educación máxima de la madre y el padre.
- Asistencia.
- Situación sentimental.
- Entre otros atributos.

3. DESARROLLO

El primer paso de este apartado es someter los datos a un proceso de selección sencillo, basándose en la correlación que presentan con los estudiantes y así cubrir el enfoque de la investigación.

Una vez obtenidos los datos, se continua con el desarrollo de los modelos de regresión simple y múltiple, el modelo de clustering y el modelo de predicción con redes neuronales, en los cuales es necesaria la utilización de diversas librerías ya que se maneja el lenguaje de programación Python, dichas librerías son: *matplotlib*, *scikit-lean* y *numpy, entre otras*.

Posteriormente se realizaron los modelos de regresión simple y múltiple, y como se menciona en regresión lineal múltiple en Python (2020), estos modelos cuentan con solo una variable dependiente y más de una variable independiente.

En el desarrollo del modelo de regresión múltiple se utilizan diversos atributos, uno de los más interesantes fue con los siguientes datos:

Medu= educación máxima de la madre, failures = materias reprobadas, absences = asistencias del estudiante y G3= calificación final (atributo a predecir).

El arrojó los siguientes resultados ver figura 4 y figura 5.

```
coefficient of determination: 0.15003404598909087
El error es:  4.218446823906083
El error de r^2 es:  0.15003404598909087
Los coeficientes son:
 [ 0.5630982   0.02396433 -2.04066495]
```

Figura 4. Errores y coeficientes obtenidos en regresión múltiple con Medu, failures, absences y G3.
Obtenido: Elaboración propia.

ISSN en trámite

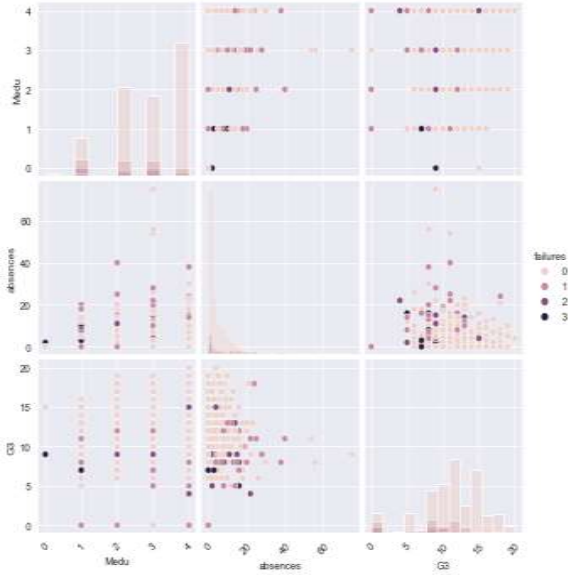


Figura 5. Gráfica obtenida con modelo regresión múltiple con Medu, failures, absences y G3.
Obtenido: Elaboración propia.

Se continuó con el desarrollo de los modelos clustering con el método K-Means y el modelo de redes neuronales.

Como menciona MacQueen 1967 en Joaquín Amat, R. (2020), el modelo de clustering agrupa las observaciones en un número específico de K clústers para su posterior análisis.

Para este modelo igualmente se utilizó el lenguaje Python aquí se hicieron diferentes exclusiones de atributos para que poder llegar a la separación de clustering óptima, todo con base a calificaciones finales de los estudiantes (ver tabla 1).

Variables excluidas del modelo clustering
calificaciones, dirección, estatus familiar, apoyo familiar, escuela de procedencia, foráneo, horas fuera de casa, sexo, tamaño de la familia, pago de actividades extra, acceso a internet, persona a cargo del estudiante, trabajo del padre y madre.

Tabla 1. Atributos descartados del modelo de clustering con K-Means.
Obtenido: Elaboración propia.

Para los criterios de exclusión de variables se fue experimentando hasta llegar a un modelo en el cual se observó una agrupación óptima de los estudiantes.

Al final de la exclusión se obtuvo el siguiente clustering de K-3 (ver figura 6).

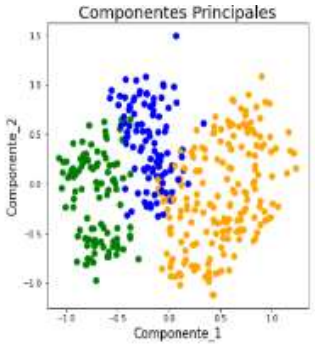


Figura 6. Gráfica obtenida con el modelo de K-Means.
Obtenido: Elaboración propia.

Para el modelo de redes neuronales donde la combinación de particiones de entrenamiento e hiperparámetros, ayudan a las métricas de validación y predicción dentro de éste; ya que como menciona Bajo, S. N. (2002), este es un modelo simplificado que emula el modo en el que el cerebro humano procesa la información, permitiendo extraer información útil y así producir inferencias a partir de los datos disponibles.

Los resultados obtenidos, fueron comparados con las calificaciones reales que se tienen en el *dataset* y son bastante cercanas generando un coeficiente de determinación de un 0.89% (ver figura 7).

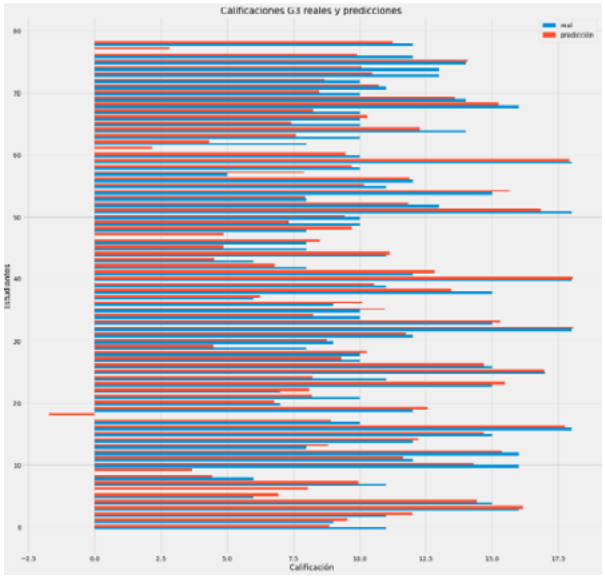


Figura 7. Gráfica obtenida con modelo de redes neuronales.
Obtenido: Elaboración propia.

Por otra parte, se trabaja en la realización de la aplicación web donde se podrán visualizar los modelos mencionados anteriormente.

ISSN en trámite

Dicha aplicación web cuenta con una serie de ventanas que muestran los diferentes modelos. En la figura 8 se presenta la página principal en la cual se tienen enlaces a las diferentes páginas del tecnológico y acceso a los modelos desarrollados.



Figura 8. Carrusel de enlaces a páginas del tecnológico y pestañas de la aplicación web.
Obtenido: Elaboración propia.

Como se ve en la figura 8 la aplicación web cuenta con una pestaña que muestra los modelos desarrollados, la cual al dar clic en uno de ellos despliega diferentes procesos de predicción, explicados para que el usuario tenga mejor manejo dentro de la aplicación web.

En la figura 9 se muestra la ventana del modelo de regresión múltiple la cual cuenta con 3 modelos establecidos para su posterior utilización por el usuario.



Figura 9. Ventana de regresión múltiple.
Obtenido: Elaboración propia.

También se cuenta con la pestaña de recursos de ayuda la cual muestra una serie de enlaces a diversos artículos para ayudar a los profesores y estudiantes en aspectos como: técnicas de mejora a la hora de enseñar, técnicas de estudio, entre otras.

4. RESULTADOS

Dentro de los resultados obtenidos importantes de mencionar esta una comparativa del modelo de regresión múltiple en donde se puede observar como interactúa el modelo con diferentes atributos.

1. *Educación de la madre y padre y fallas.*

Error: 4.427711745225454

Error cuadrado: 0.14877225468411037

Coeficiente de determinación:0.14877225468411037

2. *Educación de la madre, tiempo libre y asistencias.*

Error: 4.466023278619253

Error cuadrado: 0.04733910819444753

Coeficiente de determinación: 0.05389213253944958

3. *Tiempo de estudio, asistencias y faltas.*

Error: 4.256335977266388

Error cuadrado: 0.1346970660406004

Coeficiente de determinación: 0.1346970660406004

4. *Tiempo de estudio, tiempo afuera, tomar alcohol entre semana.*

Error: 4.5165574991249064

Error cuadrado: 0.02565792022452129

Coeficiente de determinación: 0.02565792022452129

Del mismo modo se tiene una comparativa en donde se ve la interacción de diferentes atributos dentro del modelo de clustering con el método de K-*Means*:

Atributos excluidos:

1. Sexo, edad, tamaño de la familia, pago extra, actividades complementarias situación sentimental

Gráfica obtenida

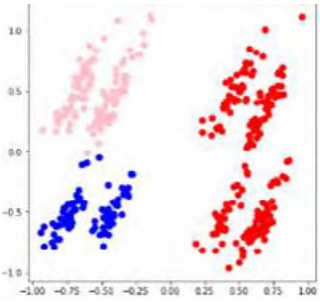


Figura 10. Gráfica obtenida con el método K-Means no tomando en cuenta los atributos de la comparativa no.1.
Obtenido: Elaboración propia.

ISSN en trámite

Atributos excluidos:

2. Sexo, edad, tamaño de la familia, pago extra, actividades complementarias situación sentimental, educación de la madre y padre, soporte escolar, guardianes, internet, estado de salud y relación con la familia.

Gráfica obtenida

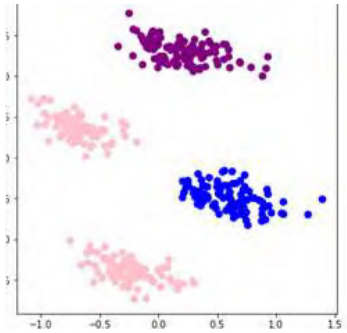


Figura 11. Gráfica obtenida con el método K-Means no tomando en cuenta los atributos de la comparativa no.2.

Obtenido: Elaboración propia.

Atributos excluidos:

3. Sexo, edad, tamaño de la familia, pago extra, actividades complementarias situación sentimental, educación de la madre y padre, soporte escolar, guardianes, internet, estado de salud, actividades extras y relación con la familia.

Gráfica obtenida

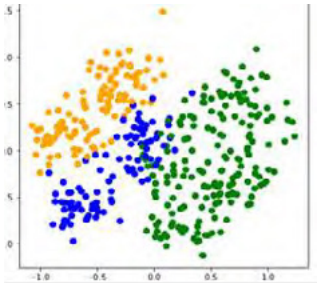


Figura 12. Gráfica obtenida con el método K-Means no tomando en cuenta los atributos de la comparativa no.3.
Obtenido: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

Se observa que expertos en innovación pedagógica se muestran partidarios de introducir técnicas de LA dentro de los procesos de enseñanza y aprendizaje, porque se pueden obtener beneficios tanto para el alumno como para el centro educativo.

Por eso, como conclusión principal se tiene que la realización, recopilación y análisis de información obtenida por parte de los distintos sistemas de información, son de gran utilidad, ya que LA puede ser aplicada desde que se inicia con recolección de datos, impactando así a los contenidos que se tienen para alumnos y profesores.

Por ello con la realización de estos modelos de LA serán un gran beneficio para los estudiantes del sistema Tecnológico, puesto que se puede lograr una mejora dentro del aprovechamiento académico. Así mismo los resultados obtenidos de esté desarrollo servirán como base para mejoras de los modelos.

REFERENCIAS

Bajo, S. N. (2002). *Redes neuronales: concepto, aplicaciones y utilidad en medicina | Atención Primaria*. Atención Primaria. https://www.elsevier.es/es-revista-atencion-primaria-27-articulo-redes-neuronales-concepto-aplicaciones-utilidad-13033737

Castro, P. R. (2016). *Universidad de La Sabana*. Obtenido de https://www.redalyc.org/jatsRepo/834/83449754006/html/index.html

Crisp-DM: *los 6 pasos del proceso de Data Mining - Blog Smartup.* (2019). Retrieved 21 December 2021, from https://blog.smartup.es/crisp-dm-6-pasos-proceso-data-mining/

Elias, T. (2011). *Learning analytics*. *Learning*, 1-22.

Hassan, R., Palaniappan, S., Mahamood, S., Abbas, A., Sarker, K., & Sattar, M. (2020, 4 junio). *Predecir el desempeño de los estudiantes en instituciones de educación superior mediante el uso de análisis de aprendizaje por video y técnicas de minería de datos*. *MDPI*, 1–20. https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3894

Joaquín Amat, R. (2020). *Clustering con Python*. Ciencia de datos. https://www.cienciadedatos.net/documentos/py20-clustering-con-python.html

Martinez Bachmann, J. (2017). *Predicting Grades for the School Year*. Kaggle. https://www.kaggle.com/janiobachmann/predicting-grades-for-the-school-year/notebook

Moine, J. M., Silvia Haedo, A., & Gordillo, S. (2011). Estudio comparativo de metodologías para minería de datos. sedici.unlp.edu.ar. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/20034/Documento_completo.pdf?sequence=1

Regresión lineal múltiple en Python. (2020). ICHI.PRO. https://ichi.pro/es/regresion-lineal-multiple-en-python-21324445754792

Rojas-Castro, P. (2017). *Learning Analytics: Una revisión de la literatura*. Redalyc.org. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83449754006

Signals: Applying Academic Analytics. (2021). Retrieved 7 October 2021, from https://er.educause.

ISSN en trámite

La Modelización como una Estrategia de Enseñanza: Ejemplo de la Caída de un Paracaidista en un Medio Resistivo

Luis G. Cabral-Rosetti* y Adriana Castillo Rosas*

* *Departamento de Postgrado CIIDET/TecNM, Av. Universidad 282 Pte. Col. Centro Querétaro, Qro., México. (Tel: 442-216-3746 Ext. 422 y 421; e-mail: lcabral@ciidet.edu.mx, acastillo@ciidet.edu.mx).*

Resumen: En este trabajo proponemos la aplicamos de la *Modelización Progresiva* como una *Estrategia de Enseñanza* para un *Curso de Dinámica Newtoniana* a nivel Licenciatura. Narramos la experiencia que hemos tenido al aplicar dicha estrategia en los *Cursos de Capacitación con Profesores del área de Ciencias Básicas* y a manera de ejemplo de los tratados en el *Curso de Capacitación*, estudiamos el caso concreto de la Caída de un Paracaidista en un Medio viscoso como el aire y comparamos con el caso de Caída Libre en el Vacío, haciendo el correspondiente desarrollo analítico y numérico de los mismos. Mostrando que la propuesta didáctica tiene un importante impacto en la construcción de sistemas conceptuales en los profesores que atendieron nuestros cursos.

Palabras Claves: modelo matemático, enseñanza, ciencias físicas, formación profesional, ingeniería

1. INTRODUCCIÓN

Los términos ***Modelo*** y ***Modelización*** se suelen usar en *Didáctica de las Ciencias* con diferentes acepciones. José María Oliva (2019), identifica al menos cinco de ellas: 1) la modelización como progresión de modelos; 2) la modelización como práctica científica; 3) la modelización como competencia; 4) la modelización en su dimensión instrumental, y 5) la modelización como estrategia de enseñanza. Cada una de estas tendencias no son necesariamente disjuntas e incompatibles, por el contrario, son marcos de referencia que de una u otra manera se complementan. Para este trabajo, aplicaremos la ***Modelización como una Estrategia de Enseñanza*** dentro de la ***Práctica Científica en las Ingenierías***, y como una ***Progresión de Modelos*** para el aprendizaje de la ***Mecánica Clásica***.

El aprendizaje basado en modelos empleado tradicionalmente en la formación en ciencias e ingeniería, puede representar una oportunidad de promover en los profesores y estudiantes de ingeniería y ciencias la oportunidad de apropiación y significación conceptual y procedimental de los saberes, superando con ello la memorización arbitraria de conceptos, algoritmos o ecuaciones. Si consideramos un ***modelo*** como una representación físco-matemática y gráfica de un fenómeno u objeto, que permite analizarlo a profundidad con la finalidad de describirlo, explicarlo y predecir su comportamiento de manera aproximada, entonces el término de ***representación*** cobra un papel central no solo para el tratamiento del fenómeno estudiado, sino también para los propios procesos de enseñanza y de aprendizaje.

Así, la modelización del fenómeno implica la intención de representar la realidad, seleccionando ciertas manifestaciones o elementos que la conforman. De acuerdo con H. Poincare (1854-1912) dicha selección se realiza considerando ciertas regularidades manifestadas en un ambiente naturalmente complejo, que al destacarlas permitirán hacer predicciones (Garbado, 2006). Con esta selección se crea una realidad intermediaria conformada por elementos fundamentales que además pueden representarse a través de lenguaje matemático.

La omisión del uso de esta estrategia en la enseñanza de temas físicos, como pretende mostrarse en este trabajo, trae como consecuencia una construcción arbitraria de relaciones conceptuales por parte del estudiante (*o del maestro*), es decir sin una comprensión real, hecho que lo lleva irremediablemente a recurrir a la memorización de corto plazo ante la falta de un desarrollo lógico y detallado. (Castillo y Cabral: 2020). Esta falta de estructuración conceptual obstaculiza el desarrollo de sus habilidades cognitivas de orden superior como el análisis, la asociación y la representación de la información, elementos clave para una memorización a largo plazo, basada en la comprensión. En ese sentido, D. Ausubel (2002) describe el aprendizaje representacional como el proceso cognitivo a través del cual se atribuye significado a diversos símbolos, o bien a lo que éstos representan.

1.1 La Modelización como Estrategia de Enseñanza

La ***Modelización*** (o ***Modelación***), tal y como sucede con toda herramienta gnoseológica, tiene diferentes interpretaciones y usos. Sin embargo, en este trabajo consideramos que es una estrategia la cual permite a los estudiantes y profesores continuar con su ciclo de desarrollo de sistemas conceptuales al permitir relacionar una situación contextual con la física a través de las matemáticas. Chevallard indica que ***"la***

ISSN en trámite

***modelación no es un aspecto más de las matemáticas, sino que la actividad matemática es en sí misma una actividad de modelación*".** (Trigueros, 2009:79), por lo que **"*La modelación puede entonces ser una actividad creadora, bien como, esencialmente descriptiva*"** (Gabardo, 2006: 319)

En ese sentido, los modelos tienen un papel central en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias (Harrison y Treagust, 2000), en especial de la Física que se enseña en los centros e institutos de Ingeniería. Por tal motivo, los modelos que usaremos aquí son representaciones plausibles de fenómenos mecánicos con los cuales pretendemos describir, explicar y predecir situaciones y hechos cercanos a los reales (Adúriz-Bravo, 2012) partiendo desde un *modelo simple o de juguete* (*toy model*) que tenga los elementos más relevantes del fenómeno a estudiar sin perder su esencia, hasta modelos complejos y sofisticados en donde aparezcan las características más realistas de la situación dinámica por describir. Sabemos todos los modelos, por más sofisticada que sea su construcción, son representaciones incompletas y aproximadas de la realidad (Morrison y Morgan, 1999; Justi, 2006; Concari, 2001, Bunge, 1973), y por tanto, susceptibles de ser siempre mejorados continuamente.

2. ESTRATEGIA DE MODELACIÓN PROGRESIVA

2.1 La Estrategia en Cursos con Profesores

La ***Estrategia de Modelación Progresiva*** (**EMP**) ha sido empleada en cuatro *Cursos de Capacitación sobre Problemas Selectos de Mecánica Clásica,* con modalidad presencial y a distancia, dirigidos a *Profesores de Ciencias Básicas*, en su mayoría Ingenieros de diferentes especialidades interesados en actualizar sus conocimientos disciplinares sobre ***Mecánica Newtoniana*.** El número de *profesores-alumnos* osciló entre cinco a veinte, y la duración de estos fue de una semana a 2 semestres, con resultados que podríamos calificar de satisfactorios.

La primera dificultad que se presentó al dictar dichos cursos es que al comenzar interrogando a los participantes sobre *cuestiones concretas básicas* de ***Mecánica Newtoniana*** (*nociones previas*), se recibieron respuestas no del todo correctas o de plano incorrectas. Esta situación llevó a replantear el curso y reexaminar conceptos básicos de Mecánica con los participantes, dado que una buena estructuración conceptual es un requisito indispensable para la modelación.

2.2 Aplicación de la Estrategia en Cursos de Capacitación

El ejercicio con los profesores se centró en el desarrollo de un número significativo de ***Problemas Retadores de Dinámica Newtoniana*** empleando como estrategia de análisis y resolución la **EMP**. *En todos los grupos se identificó una actitud de rechazo para emplear esta estrategia*, posiblemente derivada de una práctica de resolución de problemas inadecuada, es decir, sin hacer ningún tipo de análisis *Físico-Matemático*, ni antes ni después de su solución.

Esta actitud nos permitió identificar una serie de hábitos recurrentes e inconscientes que les impide plantear y resolver *Problemas de Mecánica* de manera adecuada, redundando en una práctica pedagógica mal dirigida para analizar, comprender la teórica y las aplicaciones prácticas de la *Dinámica Newtoniana*.

Una vez superada la etapa de resistencia, se pudo mostrar la conveniencia de la **EMP** como estrategia de análisis y resolución de problemas. Es decir, comenzando con los modelos más simples (*toy model*) para posteriormente irlos enriqueciendo hasta construir modelos más realistas, siempre analizando en cada caso sus alcances y recuperando los valores límite correspondiente.

En todos los grupos se observó que, a través de una *dinámica continua de ejercicios colaborativos*, es posible que los docentes de manera paulatina, aprendan a apreciar y comprender mejor la Física de la situación problemática planteada y sus limitaciones. Para ello, fue necesario facilitar un escenario de aprendizaje basado en un ***continuo debate dentro del aula de clase***, independientemente de la modalidad en la que se impartiera el curso, en el que todos los participantes participaran analizando y discutiendo el problema planteado, construyendo colaborativamente la solución buscada. Por experiencia, sabemos muy bien lo importante que es ***la verbalización como una de las acciones sustantivas para la construcción de aprendizajes significativos*** (Castillo y Cabral: 2020), hecho que evidencia la conveniencia de conformar grupos pequeños (*no más de 20 participantes*).

De las soluciones analíticas halladas, se realizó posteriormente un análisis numérico con la ayuda del software ***Wolfram* MATHEMATICA** (es claro que puede emplearse cualquier otro software especializado como **MAPLE**, **MATLAB**, **GNU OCTAVE**, **MAXIMA**, etc., para el análisis), comprobando en cada caso las "*soluciones hechas a mano*", y encontrando en algunos casos soluciones no prevista anteriormente. *Ante estos hallazgos, los docentes pudieron evidenciar que la estrategia funciona*, hecho que propicia de manera positiva un cambio de actitud hacia el curso y la estrategia planteada.

Sin embargo, entre el 25% y el 30% de los docentes en cada ocasión desertaron del curso (*desde la etapa de rechazo*). Por el contrario, los docentes que continuaron y concluyeron descubrieron su capacidad de proponer soluciones propias, elaboración de gráficas con información novedosas, entre otras posibilidades, *superando así la tradicional instrucción basada únicamente en el libro de texto*. La experiencia fue motivante para los docentes (*y para nosotros también*), propiciando un cambio de actitud basada en la confianza sobre sus nuevas habilidades. Algunos de ellos incluso aplicaron la **EMP** *como estrategia de enseñanza con sus propios alumnos de manera paralela al transcurso de capacitación*. Otros más tuvieron la

ISSN en trámite

iniciativa de llegar a las sesiones de capacitación con nuevas propuestas de *Modelos* por considerar o modificar.

En cuanto a la evaluación, como sucede en todo aprendizaje activo, *es continua* y *la propia estrategia de aprendizaje se emplea como estrategia de evaluación*, *convirtiendo el error como parte del proceso de autorregulación*.

Podemos asegurar que la **EMP** como *Estrategia de Enseñanza* en general da buenos resultados cuando los participantes al *Curso de Capacitación* juegan el *rol activo* y son capaces de asimilar y superar el desconocimiento de algunos temas de la asignatura que imparten.

3. PARACAIDISTA EN UN MEDIO VISCOSO

3.1 Construcción del Modelo Galileo-Stokes

A manera de ejemplo de los tratados en el ***Curso de Capacitación*** y de la aplicación de la **EMP**, estudiaremos simultáneamente la ***Caída de un Paracaidista*** tanto en un Medio (Aire) con ***Viscosa Lineal*** $\mathbf{F} = -\boldsymbol{\beta_l}\mathbf{v}$ (***Stokes***) y ***Cuadrática*** $\mathbf{F} = +\boldsymbol{\beta_c v^2}$ (***Newton***), es decir, con ***número de Reynolds bajos*** (**n = 1, 2**). Lo anterior lo hacemos con la finalidad de poder compararlas entre sí y con el ***Caso Sin Fricción*** (***Galileo***). Este tema nos ha permitido hacer una discusión profunda de la "***Caída de los Graves***", contrastando en todo momento los puntos de vista de ***Aristóteles*** y ***Galileo***. Y con ello, construir un ***Modelo de Galileo Mejorado*** es decir el ***Modelo Galileo-Stokes***, que discutiremos a continuación.

Las **Unidades Físicas** en las que se mide la constante "$\boldsymbol{\beta_l}$" en el **Sistema MKS** son $\mathbf{Kg}\cdot \boldsymbol{s^{-1}}$, es decir, $[\boldsymbol{\beta_l}] = [\mathbf{M}]\ [\boldsymbol{T}]^{-1}$, de igual manera, las **Unidades Físicas** en las que se mide la constante "$\boldsymbol{\beta_c}$" en el **Sistema MKS** son $\mathbf{Kg}\cdot \boldsymbol{m^{-1}}$, es decir, $[\boldsymbol{\beta_c}] = [\mathbf{M}]\ [\boldsymbol{L}]^{-1}$

3.2 Fuerzas sobre el Paracaídas

Supongamos que el paracaidista (*considerado como una partícula puntual de masa* **m**, *con todo y paracaídas*), está situado a una distancia $\mathbf{z\ (t = 0) = h}$ del origen de coordenadas y tiene una *Velocidad Nula* $\boldsymbol{v_z(t = 0) = v_{0,z} = 0}$, al inicio de la caida.

Sea $\hat{\boldsymbol{k}}$ el ***vector unitario*** en la dirección de la vertical y apuntando hacia arriba (***ver figura anexa***), entonces el peso del paracaidista (***con todo y paracaídas***) es igual a $-\ mg\ \hat{\boldsymbol{k}}$ y la resistencia del aire en el ***Caso Lineal*** es $-\boldsymbol{\beta_l} v_z\ \hat{\boldsymbol{k}}$ (notemos que ***dicha fuerza apunta hacia arriba***, puesto que $v_z < 0$ y, por tanto $-\boldsymbol{\beta_l} v_z > 0$). En el ***Caso Cuadrático*** es $+\boldsymbol{\beta_c} v_z^2\ \hat{\boldsymbol{k}}$ (notemos que ***dicha fuerza también apunta hacia arriba***, puesto que $v_z^2 > 0$ y por tanto $+\boldsymbol{\beta_c} v_z^2 > 0$), ver la Figura 1.

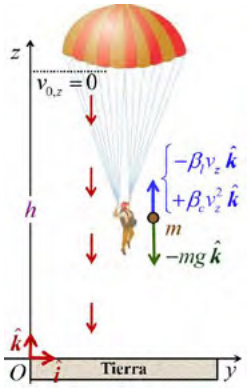


Fig. 1. Diagrama que muestra la caída del paracaídas en un medio viscoso como el aire, y las correspondientes fuerzas actuando sobre él.

De tal manera que la ***Fuerza Neta*** actuando sobre "**m**" son:

$$\bar{\boldsymbol{F}}_{Neta} = \overbrace{\bar{\boldsymbol{F}}_{Peso}}^{Galileo} + \overbrace{\bar{\boldsymbol{F}}_{Resistencia\ del\ Aire}}^{Stokes} \Rightarrow$$

$$\bar{\boldsymbol{F}}_{Neta} = \begin{cases} -mg\,\hat{\boldsymbol{k}}, & \textbf{\textit{Sin Fricción}}\ \textbf{(Galileo)} \\ -\left(mg + \beta_l v_z\right)\hat{\boldsymbol{k}}, & \textbf{\textit{Fricción Lineal}}\ \textbf{(Stokes)} \\ -\left(mg - \beta_c v_z^2\right)\hat{\boldsymbol{k}}, & \textbf{\textit{Fricción Cuadrático}}\ \textbf{(Newton)} \end{cases}$$

Por la ***Segunda Ley de Newton***:

$$m\frac{dv_z}{dt}\hat{\boldsymbol{k}} = \begin{cases} -mg\,\hat{\boldsymbol{k}} \ldots (1a) \\ -\left(mg + \beta_l v_z\right)\hat{\boldsymbol{k}} \ldots (1b) \\ -\left(mg - \beta_c v_z^2\right)\hat{\boldsymbol{k}} \ldots (1c) \end{cases}$$

Es claro que el movimiento se lleva a cabo todo el tiempo sobre el "***eje z***" y por tanto ***prescindimos del vector unitario*** $\hat{\boldsymbol{k}}$. Por tanto, escribimos las ***Ecuaciones Diferenciales de los Tres Casos de Interés*** en "***Forma Escalar***".

A continuación, resolveremos explícitamente el ***Modelo Galileo-Stokes***, encontrando las cantidades físicas más relevantes del mismo, así como sus valores límite.

3.3 Rapidez del Paracaidista en los Tres Modelos

Separando Variables de las **Ecs. (1)**, podemos *Integrarlas*, aplicando las *Condiciones Iniciales*

ISSN en trámite

$$\begin{cases} \int_{v_{0,z}=0}^{v_z} dv'_z = -g\int_{t_0=0}^{t} dt' \ldots (2a) \\ \int_{v_{0,z}=0}^{v_z} \dfrac{m dv'_z}{mg+\beta_l v_z} = -\int_{t_0=0}^{t} dt' \ldots (2b) \\ \int_{v_{0,z}=0}^{v_z} \dfrac{dv'_z}{g\left(1-\frac{\beta_c}{mg}v'^2_z\right)} = -\int_{t_0=0}^{t} dt' \ldots (2c) \end{cases} \Rightarrow$$

$$v_z(t) = \begin{cases} -g\,t \ldots (3a) \\ -\dfrac{mg}{\beta_l}\left(1+e^{-\frac{\beta_l t}{m}}\right) \ldots (3b) \\ -\sqrt{\dfrac{mg}{\beta_c}}\tanh\left(\sqrt{\dfrac{g\beta_c}{m}}\,t\right) \ldots (3c) \end{cases}$$

en donde para hallar la expresión analítica **(3c)** hemos hecho una ***Descomposición en Fracciones Simples*** y hemos usado el hecho de que el ***Logaritmo Natural*** y la ***Tangente Hiperbólica Inversa*** (Spiegel, 1998: 211, 34, 247, 61, 31-36, 84-87; Soare, 2007:274) están relacionados. El comportamiento de la Rapidez de caída del Paracaidista se puede observar en la Figura 2.

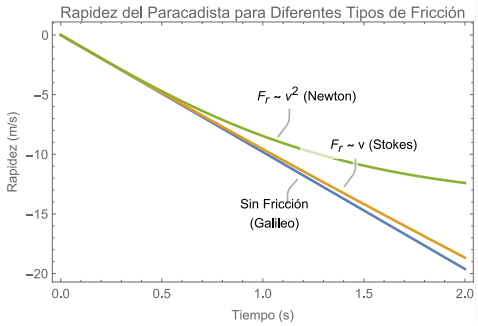


Fig. 2. Rapidez del Paracaidista en los Tres Modelos, y para valores específicos de: m = 10 Kg., g = 9.81 m/s^2, $\beta_l = \beta_c = 0.5$.

3.4 La Velocidad Terminal del Paracaidista

De las **Ecs. (3)** observamos que cuando ***el tiempo aumenta sin límite*** **(t→∞)**, la ***Velocidad del Paracaidista*** tiende a los valores constantes: $-\frac{mg}{\beta_l}$ y $-\sqrt{\frac{mg}{\beta_l}}$ respectivamente, de tal forma que el *Paracaidista* se mueve con una ***Rapidez*** que es ***Prácticamente Constante*** en ambos casos (Symon, 1971: 41), es decir:

$$v_z(t\to\infty) = \begin{cases} \lim\limits_{t\to\infty}\left\{-\dfrac{mg}{\beta_l}\left(1+e^{-\frac{\beta_l t}{m}}\right)\right\} \\ \lim\limits_{t\to\infty}\left\{-\sqrt{\dfrac{mg}{\beta_c}}\tanh\left(\sqrt{\dfrac{g\beta_c}{m}}\,t\right)\right\} \end{cases} \Rightarrow$$

$$v_{t,l}(t\to\infty) = -\frac{mg}{\beta_l} = \textbf{cte.} \ldots (4a)$$

$$v_{t,c}(t\to\infty) = -\sqrt{\frac{mg}{\beta_c}} = \textbf{cte.} \ldots (4b)$$

donde $v_{t,l}$ y $v_{t,c}$ son las llamadas ***Velocidad Terminal Lineal*** y ***Velocidad Terminal Cuadrática*** respectivamente. ¡Esto significa que, pasado un cierto tiempo, el Paracaidista llegará a Tierra con Velocidad Constante! (Franco, 2015). Ver la Figura 3.

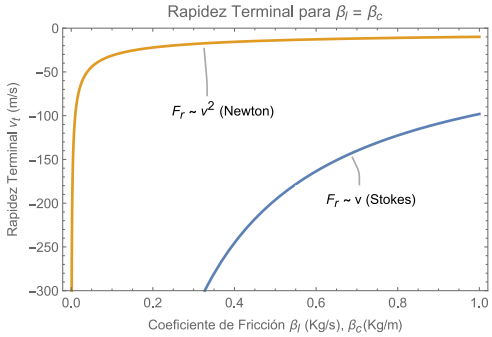


Fig. 3. Velocidad Terminal del Modelo Galileo-Reynolds para valores específicos de: m = 10 Kg., g = 9.81 m/s^2.

3.5 Distancia Recorrida en los Tres Modelos

En vista de que $v_z(t) = dz/dt$ procedemos a integrar usando las correspondientes ***Condiciones Iniciales*** en las **Ec. (3)** ***Separando Variables***, para encontrar las ***Distancias Recorridas por el Paracaidista***, es decir:

$$\int_{z_0=h}^{z} dz' = \begin{cases} -g\int_{t_0=0}^{t} t'dt' \\ -\int_{t_0=0}^{t}\left(\dfrac{mg}{\beta_l}\right)dt' + \dfrac{mg}{\beta_l}\int_{t_0=0}^{t} e^{-\frac{\beta_l t'}{m}}\,dt' \\ \int_{t_0=0}^{t} dt' - \sqrt{\dfrac{mg}{\beta_c}}\int_{t_0=0}^{t}\tanh\left(\sqrt{\dfrac{g\beta_c}{m}}\,t'\right)dt' \end{cases} \Rightarrow$$

$$z(t) = \begin{cases} h - \dfrac{1}{2}gt^2 \ldots (5a) \\ h - \dfrac{mg}{\beta_l}t + \dfrac{m^2 g}{\beta_l^2}\left(1-e^{-\frac{\beta_l t}{m}}\right) \ldots (5b) \\ h - \frac{m}{\beta_c}\ln\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\,t\right)\right] \ldots (5c) \end{cases}$$

La **Ecs. (5)** representa el **"*Desplazamiento del Paracaidista*"** para cualquier tiempo, es decir, desde que salto del avión, hasta llegar a tierra. Ver la Figura 4.

ISSN en trámite

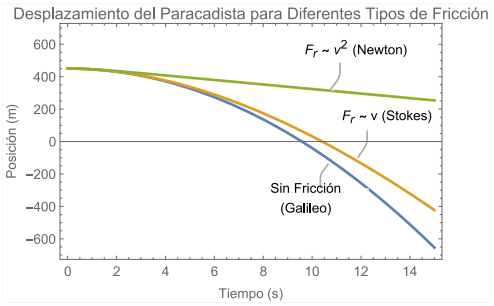


Fig. 4. Desplazamiento del Paracaídas en los Tres Modelos para valores específicos de: m = 10 Kg., g = 9.81 m/s^2, $\beta_l = \beta_c =$ 0.5, h = 450 m.

3.6 Aceleración del Paracaidista en los Tres Modelos

Sabiendo que la ***Aceleración es la Derivada de la Velocidad*** $a_z = \frac{dv_z}{dt}$ procedemos a derivar con respecto al tiempo las **Ecs. (3)**, para encontrar las ***Aceleraciones del Paracaidista*** (ver la Figura 5):

$$a_z(t) = \begin{cases} -g \ldots (6a) \\ -g\, e^{-\frac{\beta_l t}{m}} \ldots (6b) \\ -g \sec h^2\left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\, t\right) \ldots (6c) \end{cases}$$

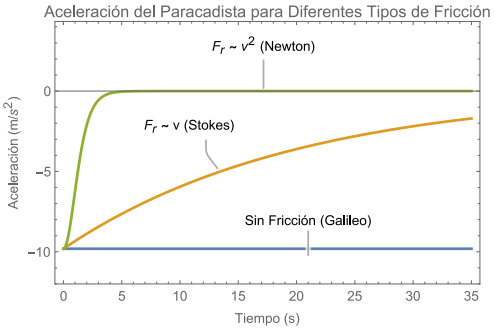


Fig. 5. Aceleración del Paracaidista en los Tres Modelos para valores específicos de: m = 10 Kg., g = 9.81 m/s^2, $\beta_l = \beta_c =$ 0.5.

3.7 Recuperando las Condiciones Iniciales

Usando las ***Expansiones Taylor*** de las ***Funciones Logarítmicas***, ***Hiperbólicas*** y ***Exponenciales***, observamos que se recuperan adecuadamente las ***Condiciones Iniciales del Problema*** tomando los correspondientes límites cuando $\mathbf{t \to 0}$ a las **Ecs. (3), (5)** y **(6)**, es decir:

$$z(t \to 0) = \begin{cases} \lim\limits_{t\to 0}\left\{h - \frac{1}{2} g t^2\right\} = h \ldots (7a) \\ \lim\limits_{t\to 0}\left\{h - \frac{mg}{\beta_l} t + \frac{m^2 g}{\beta_l^2}\left(1 - e^{-\frac{\beta_l t}{m}}\right)\right\} = h \ldots (7b) \\ \lim\limits_{t\to 0}\left\{h - \frac{m}{\beta_c} \ln\left[\cos h\left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\, t\right)\right]\right\} = h \ldots (7c) \end{cases}$$

$$v_z(t \to 0) = \begin{cases} \lim\limits_{t\to 0}\{-g\, t\} = 0 \ldots (8a) \\ \lim\limits_{t\to 0}\left\{-\frac{mg}{\beta_l}\left(1 + e^{-\frac{\beta_l t}{m}}\right)\right\} = 0 \ldots (8b) \\ \lim\limits_{t\to 0}\left\{-\sqrt{\frac{mg}{\beta_c}} \tan h\left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\, t\right)\right\} = 0 \ldots (8c) \end{cases}$$

$$a_z(t \to 0) = \begin{cases} \lim\limits_{t\to 0}\{-g\} = -g \ldots (9a) \\ \lim\limits_{t\to 0}\left\{-g\, e^{-\frac{\beta_l t}{m}}\right\} = -g \ldots (9b) \\ \lim\limits_{t\to 0}\left\{-g \sec h^2\left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\, t\right)\right\} = -g \ldots (9c) \end{cases}$$

3.8 Análisis cuando desaparece la Fricción: $\beta_{l,c} \to 0$

En las **Ecs. (3)** y **(6)** de nuestro análisis, aparecen siempre las ***Funciones Exponenciales e Hiperbólicas***. Para poder hacer el análisis solicitado es necesario conocer el ***Desarrollo en Serie de Taylor alrededor de cero***.

$$v_z(\beta_{l,c} \to 0) = \begin{cases} \doteq \lim\limits_{\beta_l \to 0}\left\{-\frac{mg}{\beta_l} + \frac{mg}{\beta_l} - \frac{m\beta_l g t}{\beta_l m} + \ldots\right\} \Rightarrow \\ \doteq \lim\limits_{\beta_l \to 0}\left\{-\sqrt{\frac{mg}{\beta_c}}\left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\, t + \frac{1}{3}\left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\, t\right)^3 \ldots\right)\right\} \Rightarrow \end{cases}$$

$$v_z(\beta_l \to 0) = -g\, t \ldots (10a)$$
$$v_z(\beta_c \to 0) = -g\, t \ldots (10b)$$

De la **Ecs. (10)** reconocemos inmediatamente la típica expresión de la ***Caída Libre Sin Fricción***, lo cual nos dice que las expresiones **Ec. (3)** son la velocidad correcta para la caída en un medio viscoso, con ***Viscosidad Lineal*** o ***Cuadrático***.

De forma análoga procedemos con las aceleraciones dadas en las **Ecs. (6),**

$$a_z(\beta_{l,c} \to 0) = \begin{cases} \doteq \lim\limits_{\beta_l \to 0}\left\{-g + g\frac{\beta_l t}{m} + \ldots\right\} \Rightarrow \\ \doteq \lim\limits_{\beta_c \to 0}\left\{-g\left(1 - \left(\sqrt{\frac{g\beta_c}{m}}\, t\right)^2 + \ldots\right)^2\right\} \Rightarrow \end{cases}$$

ISSN en trámite

$$a_z(\beta_l \to 0) = -g \ldots (11a)$$
$$a_z(\beta_c \to 0) = -g \ldots (11b)$$

La **Ecs. (11)** son la ***Aceleración de una Partícula en Caída Libre***, es decir, ***Sin Fricción***. Por tanto, las **Ecs. (6)** dan la expresión de la aceleración correcta para el ***Modelo de Caída en un Medio Viscoso Lineal*** **(*Stokes*)** o ***Cuadrático*** (***Newton***) con la Velocidad.

4. SOLUCIONES CON WOLFRAM MATHEMATICA

Para completar el estudio en el marco de la **EMP** y con la finalidad de hacer comparaciones a modo de autorregulación (autoevaluación) entre las ***Soluciones Hechas a Mano*** y las Soluciones que ofrece el ***Software de Cálculo Simbólico Wolfram*** **MATHEMATICA** de las ***Ecuaciones Diferenciales*** (1). Escribimos un par de líneas en la sintaxis de **MATHEMATICA** para obtener las soluciones analíticas buscadas (Kulp, 2021).

$$\text{Paracasol} = \text{DSolve}[\{mz''[t] == -mg + \text{Fric}, z[0] = = h, z'[0] == 0\}, z[t], t];$$

$$\text{posz} = \text{Collect}[z[t]/.\,\text{Paracasol}[[1]], \{m\}]//\text{ExpandAll}$$

donde:

$\text{Fric} = 0, -\beta_l z'[t], \beta_c (z'[t])^2$, en cada caso por separado.

Con lo anterior obtenemos la ***Posición del Paracaidista***, que al derivarla obtenemos la ***Velocidad del Paracaidista,*** y al derivarla de nuevo esta última expresión, hallamos la ***Aceleración del Paracaidista.***

$$\text{velz} = D[\text{posz}, t]//\text{ExpandAll}$$

$$\text{acelz} = D[\text{velz}, t]//\text{ExpandAll}$$

Con las soluciones obtenidas obtenemos los casos conocidos cuando hacemos $t \to 0, t \to \infty, \beta_l, \beta_c \to 0$, respectivamente con:

$\text{Limit}[\text{posz}, t \to 0], \text{Limit}[\text{velz}, t \to \text{Infinity}]$, etc.

Encontrando perfecta concordancia en los resultados analíticos. Lo anterior nos ha servido para testear nuestras soluciones y para desarrollar habilidades computaciones en Maestros y Alumnos.

Por otro lado, usando el comando **VectorPlot** de **MATHEMATICA**, es posible hallar los ***Campos Direccionales de Velocidades*** y las ***Curvas Soluciones de las Ecuaciones Diferenciales*** **Ec. (1b)** y **(1c).** Los cuales nos ayudaran a comprender mejor las soluciones obtenidas y conocer nuevas soluciones $(\boldsymbol{v_{0,z} > v_t \; y \; v_{0,z} < v_t})$ no consideradas aquí. Obteniendo gráficas como las ***Figuras 6*** y *7*.

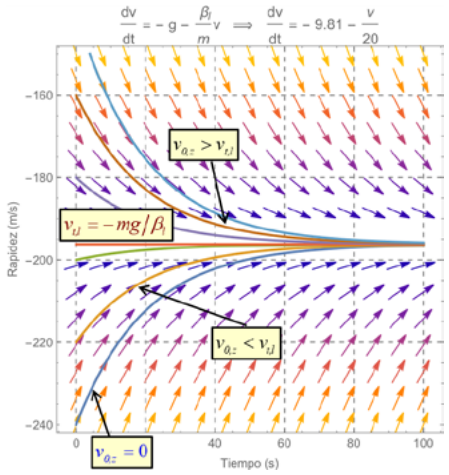


Fig. 6. ***Campo Direccional de Velocidades*** y ***Curvas Solución*** del ***Modelo Galileo-Stokes Lineal***, **Ec. (1b)** ***Caso de Fricción Viscosa Lineal en la Velocidad***, y para valores específicos de: m = 10 Kg., g = 9.81 $m\ /\ s^2$, $\beta_l = 0.5$, y $v_{t,l} = -196.2\ m/s$.

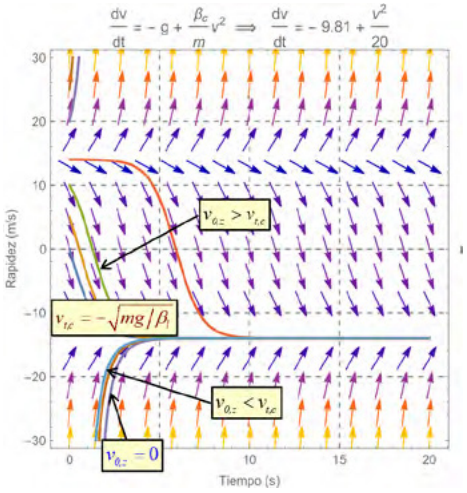


Fig. 7. ***Campo Direccional de Velocidades*** y ***Curvas Solución*** del ***Modelo Galileo-Stokes Cuadrático***, **Ec. (1c)** ***Caso de Fricción Viscosa Cuadrática en la Velocidad***, y para valores específicos de: m = 10 Kg., g = 9.81 $m\ /\ s^2$, $\beta_c = 0.5$ y $v_{t,c} = -14.0\ m/s$.

5. MODELOS MÁS REALISTAS

A pesar de ser satisfactorios los ***Modelos de Caída con Paracaídas en Medios Viscosos*** (***Modelo Galileo-Stokes***) vistos arriba, sabemos que son susceptibles de ser mejorados y/o generalizados.

ISSN en trámite

Lo descrito anteriormente es una primera parte de nuestro proyecto de investigación en donde tenemos contemplado estudiar casos más generales y realistas, tales como: la ***Caída del Paracaídas cuando existen diferentes etapas de la caída***, cuando ***el medio no es una atmósfera uniforme sino variable con la altura***, etc. Así como extensiones y generalizaciones a otras situaciones tales como, ***caída de una gota de agua en una atmósfera saturada de vapor de agua (nube)***, ***caída de un objeto desde una altura lo suficientemente grande en donde la gravedad Terrestre fuese variable con la altura***, etc.

Todos esos trabajos están en proceso de realización bajo la óptica de la **EMP** para ser utilizados por los profesores en la enseñanza de la Mecánica y por los estudiantes para su aprendizaje de la misma.

6. CONCLUSIONES

El uso de la ***Estrategia de Modelación Progresiva*** (**EMP**) en la ***Enseñanza de la Mecánica*** desempeña un papel esencial en el aprendizaje de las ciencias a nivel universitario. Los tres modelos de caída de un paracaidista vistas aquí son útiles para la comprensión de dicho fenómeno, así como para entender sus alcances y limitaciones.

El uso de herramientas computacionales tales como el Software ***Wolfram*** **MATHEMATICA** (o de cualquier otro, **MATLAB**, **MAPLE**, **GNU OCTAVE**, **MAXIMA**, etc.), sirven como apoyo para la construcción y cálculo (*analítico y simbólico*) de los modelos y sus extensiones.

Creemos que la incorporación de la **EMP** sirve a los profesores y sus estudiantes en sus clases para conocer a profundidad los modelos y sus limitaciones que tiene que enseñar a sus alumnos, y *sirve además para explorar, revisar, probar, evaluar y crear modelos propios* de la ***Mecánica Clásica*** en sus estudios de Ingeniería.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo, agradecemos a la ***Dirección de Posgrado, Investigación e Innovación del TecNM*** el apoyo brindado al Proyecto de Investigación, ***Modelización en Mecánica: Una estrategia para el Aprendizaje de la Dinámica*****, Clave: 11001.21-P**, en su convocatoria 2021.

Los autores del presente trabajo, agradecen también al **"*revisor anónimo 2*"**, los comentarios y sugerencias solicitadas. Fruto de ello, es la explicación pormenorizada (***que se nos ha solicitado***) de cómo ha sido utilizada y aplicada la ***Estrategia de Enseñanza de la Modelización Progresiva*** (**EMP**) en la Sección 2 de este trabajo.

REFERENCIAS

Adúriz-Bravo, A. (2012). Algunas características clave de los modelos científicos relevantes para la educación química. *Educación Química*, 23, 1-9. https://doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30151-9.

Ausubel, D. (2002). Adquisición y retención del conocimiento. Una perspectiva cognitiva. España: Paidós.

Bunge, M. (1973). Method, Model and Matter. Dordrecht: Reidel Publishind Company.

Castillo, A. y Cabral, L. G. (2022) Del concepto a la conceptualización: una construcción significativa. *Latin-American Journal of Physics Education*, *14* (3), 3301-1 – 3301-7. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7803856

Concari, S. B. (2001). Las teorías y modelos en la explicación científica: implicancias para la enseñanza de las ciencias. *Ciência & Educação* (Bauru), 7(1), 85-94. https://www.scielo.br/j/ciedu/a/S8YNmm7XZkLn4rrwD8psPCw/?format=pdf&lang=es

Franco, A. F. (2015) Curso Interactivo de Física en Internet (Movimiento de un cuerpo en el seno de un fluido), Universidad del País Vasco. Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa (sección Eibar) EIBAR (Guipúzcoa). España. http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/

Gabardo, L. (2006) Modelación Matemática y ontología. *Acta Latinoamericana de Matemática Educativa*, *19*: 317-323. https://core.ac.uk/download/pdf/33251104.pdf

Harrison, A. G. y Treagust, D. F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 1011-1026. https://doi.org/10.1080/095006900416884

Justi, R. (2006). La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(2), 173-184. https://core.ac.uk/download/pdf/13271794.pdf

Morrison, M. y Morgan, M. S. (1999). Models as mediating instruments. En M. S. Morgan y M. Morrison (eds.), *Models as mediators* (pp. 10-37). Cambridge: Cambridge University Press.

Oliva, J. (2019) Distintas concepciones para la idea de modelización en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las ciencias,* *37*(2). 5-24. https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2648

Soare, M. V., Teodorescu, P. P. and Toma, I. (2007) *Ordinary Differential Equations with Applications to Mechanics.* Springer.

Spiegel, M. R. y Abellanas, L. (1998) *Serie Schaum, Fórmulas y Tablas de Matemática Aplicada.* España: Ed. Mc Graw-Hill

Symon, K. R. (1971) *Mecánica.* España: Editorial Aguilar.

Trigueros, M. (2009) El uso de la modelación en la enseñanza de las matemáticas. *Innovación Educativa.* https://www.redalyc.org/pdf/1794/179414894008.pdf

ISSN en trámite

Herramienta Computacional de Bajo Costo para la Enseñanza de la Ingeniería de Control

Felipe J. Torres*, Fabio A. Aguirre, Israel Martínez,***
Fabrizio López*, Macario Ramírez* y Harold A. Barrón*

**División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, CP 36880*
México (e-mail: fdj.torres@ugto.mx)
***Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas, CP 60950*
México (e-mail: fabio.aguirre@lcardenas.tecnm.mx)

Resumen: Este artículo presenta el uso de una herramienta computacional de bajo costo, que consiste en una minicomputadora de placa y software libre, como alternativa a la utilización común de equipo de cómputo de gran capacidad de hardware con software bajo licencia en la enseñanza de la ingeniería de control clásico a estudiantes de nivel superior. Ejemplos básicos de los primeros temas que se abordan en un curso de control, como el álgebra de bloques y la respuesta de un sistema ante una entrada escalón, son presentados para comprobar el correcto funcionamiento de la herramienta propuesta en comparación con la empleada de manera tradicional y que, además, es ampliamente sugerida en la bibliografía de cualquier temario de un curso de control, alrededor del mundo.

Palabras clave: Enseñanza de la ingeniería, Educación de control, minicomputadora, herramienta de software.

1. INTRODUCCIÓN

La crisis económica mundial como consecuencia de la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2, tiene un panorama desalentador durante los próximos años para los países emergentes y en desarrollo. Las repercusiones son fuertes y de manera omnidireccional, en particular, la educación en todos los niveles se ha visto afectada. De acuerdo a la Encuesta para la Medición del Impacto COVID-19 en la Educación en México, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se detalla que en el ciclo escolar 2020-2021 se dejaron de inscribir 5.2 millones de estudiantes entre 3 y 29 años de edad; 9.6% menos en relación con los inscritos en el ciclo escolar 2019-2020, de los cuales el 5.4% fue por falta de recursos (ECOVID-ED, 2020).

Por otra parte, en la educación de la ingeniería en el nivel superior se ha convertido en una necesidad el uso de equipo de cómputo como herramienta que permite realizar cálculos matemáticos, simulaciones, diseños, etc. de manera que el proceso de enseñanza-aprendizaje sea desarrollado de forma más pragmática. Así, en la mayoría de los temarios de cursos de Ingeniería de Control en todo el mundo, se toma como bibliografía base aquella que sugiere ampliamente el uso del software bajo licencia Matlab™, por ejemplo, en ECE (2020), MIT (2013) y Nptel (2021).

Notar que Matlab™ es un software de cálculo matemático con amplios desarrollos de herramientas, funciones, entorno gráfico, etc. que se ha posicionado como un referente en la educación e investigación de la ingeniería. Matlab™ para su versión 2021b, el fabricante recomienda ser instalado en un equipo de cómputo que tenga sistema operativo Windows 10 o superior, procesador Intel o AMD x86-64 con 4 núcleos, 5-8 GB de espacio de disco duro y 8 GB de memoria RAM. Por tanto, una computadora personal, con los requerimientos para soportar a Matlab®, es de alto costo ($16,000.00 MXN en adelante). Adicionalmente, el costo de la licencia por usar Matlab™ durante 1 año es de USD 860.00 ($17,000.00 MXN), haciendo que no sea de fácil adquisición para un estudiante de educación de nivel superior en México.

En este artículo se propone el uso de una herramienta computacional de bajo costo que consiste de una Raspberry Pi, que es una minicomputadora en placa, y con el software libre GNU-Octave para la enseñanza del curso de Ingeniería de Control a través de ejemplos básicos que permitan la comparación con los resultados obtenidos por el empleo de la herramienta computacional comúnmente usada (computadora personal y Matlab™).

El resto del documento se encuentra organizado así: en la sección 2 se detallan las características de la herramienta computacional propuesta; en la sección 3 se describen los ejemplos básicos de un curso de Ingeniería de Control; en la

ISSN en trámite

sección 4 se comparan los resultados obtenidos con aquellos derivados de una computadora personal y Matlab™; por último, en la sección 5 se dan las conclusiones y trabajos futuros.

2. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DE BAJO COSTO

2.1 Raspberry Pi

Raspberry PI® (RPi) es una minicomputadora en placa, de tamaño de una tarjeta de crédito, desarrollada en Reino Unido por la fundación Raspberry Pi con la intención de estimular la enseñanza de las ciencias computacionales básicas en escuelas (Sarthak, 2014). Es posible instalar sistemas operativos de Linux o incluso Windows® 10, además, la fundación provee un sistema operativo en particular conocido como Raspbian, basado en Debian, el cual contiene preinstalado GNU-Octave y Python como lenguajes de programación.

Desde su lanzamiento en 2012, la RPi ha sido mejorada en versiones posteriores. En la Figura 1 se observa una imagen de la Raspberry Pi 3B+, utilizada en esta propuesta como el hardware computacional que contiene las características dadas en la Tabla 1 (RPi, 2018), con un costo de $1,750.00 MXN.

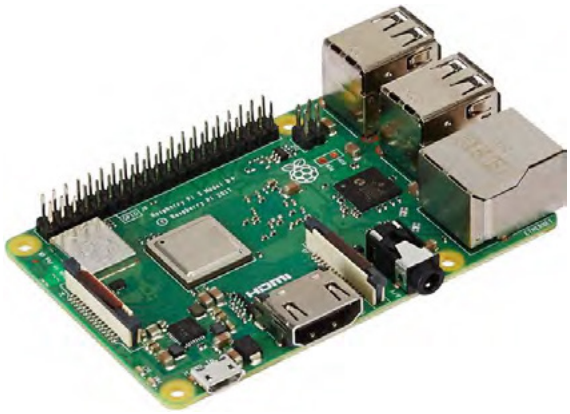


Figura. 1. Raspberry Pi 3B+.

Tabla 1. Especificaciones de la Raspberry Pi 3B+

Chip	Broadcom BCM2837B0
Procesador	Quad-core ARM Cortex-A53
CPU	1.4 GHz
Memoria	1GB LPDDR2 SDRAM
Dimensiones	85 x 56 x 17mm
Alimentación	5 V CD / 2.5 A, micro USB .
Conectividad	Wifi 2.4GHz y 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac, Bluetooth 4.2, BLE, Ethernet: Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 (300 Mbps).
Conectores	1 HDMI, 1 3.5mm jack, 4 USB 2.0, 1 interfaz de cámara CSI-2, 40 pines de Entrada/Salida de Propósito General
de salida	

2.2 GNU-Octave

Es un lenguaje de programación científico con ponderosa sintaxis orientada a cálculo matemático que permite el uso de herramientas de visualización y de gráficas en 2D y 3D. Se trata de un software libre que se ejecuta sobre GNU/Linux, macOS, BSD y Microsoft Windows (Octave, 2022). Una de las características más importantes es que sus códigos *(scripts)* son altamente compatibles con Matlab™.

En la Raspberry Pi, el intérprete de GNU-Octave puede usarse a través del modo de Interfaz Gráfica de Usuario (GUI), como una consola o como parte de un código de órdenes *(shell-script*). En el sistema operativo Raspbian, GNU-Octave viene preinstalado, sin embargo, es necesario instalar paquetes de programación en función de la tarea a desarrollar. En particular para el enfoque propuesto se hace uso del paquete *control* como se observa en la Figura 2.

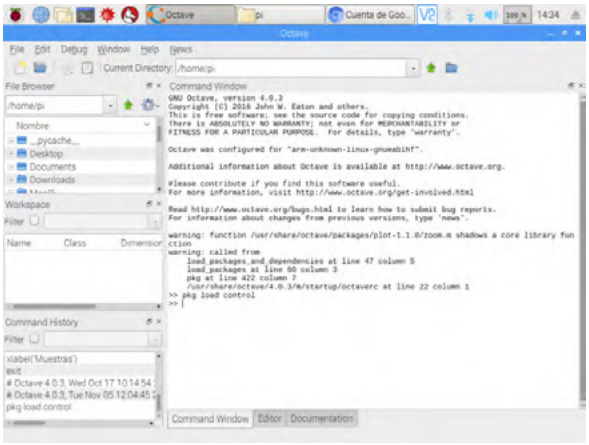


Figura. 2. GUI de Octave en la RPi.

3. EJEMPLOS BÁSICOS DE CURSO DE CONTROL

En los temarios de los cursos de Ingeniería de Control que se desarrollan en el nivel superior, se inicia con temas como el álgebra de bloques, función de transferencia, modelado de sistemas, respuesta en el tiempo de sistemas de primer y segundo orden, entre otros. A continuación, en la Tabla 2 se presentan algunas sintaxis de funciones que se emplean tanto en Matlab™ como en GNU-Octave (con el paquete *control*) y que son básicas para los temas descritos líneas arriba.

ISSN en trámite

Tabla 2. Algunas funciones del paquete control en GNU-Octave.

tf(num,den)	Crea o convierte a un modelo en función de transferencia
step(sys)	Respuesta al escalón de un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI).
feedback(sys1,sys2)	Conexión de retroalimentación de dos modelos LTI.
series(sys1,sys2)	Conexión serie de dos modelos LTI.
parallel(sys1,sys2)	Conexión paralelo de dos modelos LTI.
zpk(z,p,k)	Crea un modelo en función de transferencia a partir de los datos de ceros, polos y ganancia.

3.1 Ejemplo 1. Reducción de bloques.

Los elementos de un sistema de control son representados a través de bloques que se interconectan entre sí para formar un diagrama de bloques total, el cual puede contener a la planta o sistema, controlador, actuador, sensor, etc. En cada bloque se introduce la función de transferencia que modela al elemento relacionado.

Para conocer el comportamiento del sistema de control ante una entrada, es decir, encontrar la relación de la salida respecto a la entrada, es necesario reducir el diagrama de bloques a un solo bloque a través del álgebra de bloques que incorpora expresiones para los casos en donde los bloques se encuentren en serie, paralelo o retroalimentación. En la Figura 3 se presenta el diagrama de bloques a reducir y en la Figura 4 se muestra el inicio del script desarrollado en GNU-Octave sobre la RPi para solucionar este ejemplo.

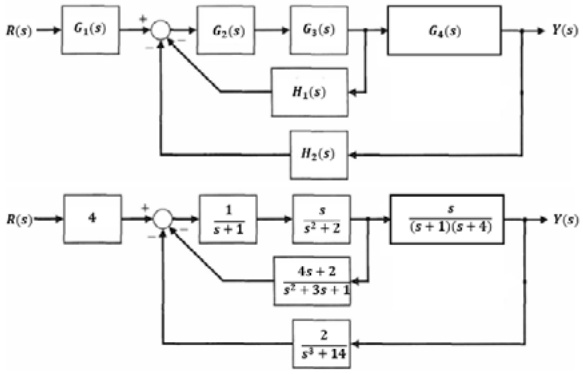


Figura. 3. Diagrama de bloques a reducir.

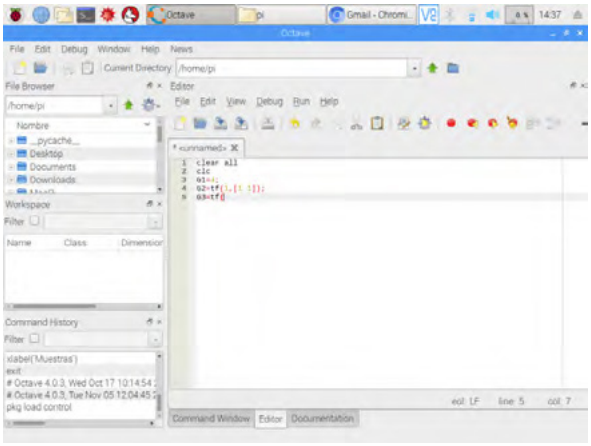


Figura. 4. Redacción del script de solución del ejemplo 1.

El algoritmo de solución se presenta a continuación:
Paso 1. Serie entre G2 y G3.
Paso 2. Retroalimentación entre Paso 1 y H1.
Paso 3. Serie entre Paso 2 y G4.
Paso 4. Retroalimentación entre Paso 3 y H2.
Paso 5. Serie entre Paso 4 y G1.

3.2 Ejemplo 2. Graficar y analizar la respuesta en el tiempo de un sistema de segundo orden.

La representación gráfica de la salida de un sistema ante una entrada conocida, comúnmente de tipo escalón, es importante para que el estudiante comprenda y analice algunos parámetros, por ejemplo, para un sistema de primer orden ¿cuál es la constante de tiempo? o ¿cuánto es el tiempo de asentamiento? Si se trata de un sistema de segundo orden, se puede observar el tipo de respuesta: sobre-amortiguada, sub-amortiguada, críticamente amortiguada o no amortiguada. Particularmente para el tipo de respuesta sub-amortiguada se hace un análisis del tiempo pico, porcentaje de sobretiro y tiempo de asentamiento.

Así, el enunciado de un ejercicio que siga las características señaladas en el párrafo anterior es:
Sea un sistema LTI modelado por la función de transferencia,

$$G = \frac{100}{s^2 + 5s + 100} \quad (1)$$

a. Grafique la respuesta del sistema en función del tiempo ante una entrada escalón.
b. Calcule el tiempo pico, tiempo de asentamiento y porcentaje de sobretiro.

La solución del ejercicio por medio de la herramienta computacional de bajo costo propuesta es vista en la Figura 5.

ISSN en trámite

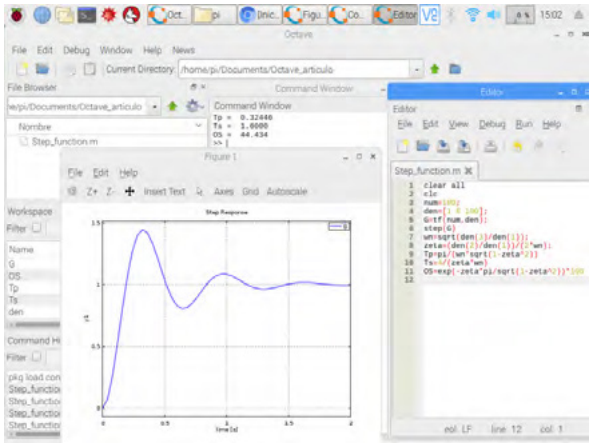


Figura. 5. Solución del ejemplo 2 a través de GNU-Octave sobre una Raspberry Pi.

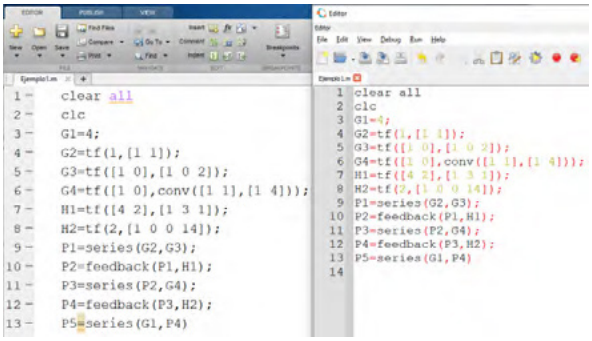
4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para propósitos de comparación, se toma como referencia los resultados de los ejemplos obtenidos por medio del uso de Matlab™ ejecutado en una computadora personal con las características que se señalan en la Tabla 3, a la cual se le denominará herramienta 1. Mientras que la herramienta computacional de bajo costo (GNU-Octave en una Raspberry Pi) será llamada herramienta 2.

Tabla 3. Características de la herramienta computacional que sirve de referencia.

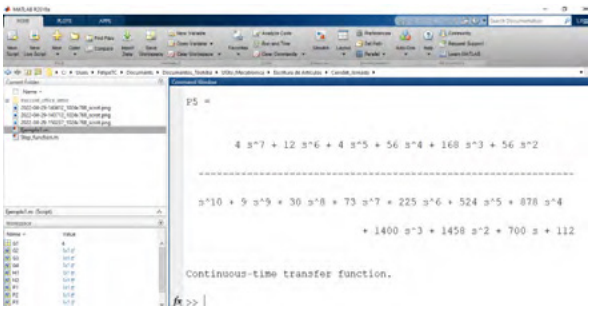
Modelo	Acer, Aspire F5-573
Procesador	Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz 2.70 GHz
RAM	16.0 GB (15.9 GB usable)
Sistema operativo	Windows 10 de 64 bits
Matlab™	R2018a 64 bits

Para el ejemplo 1, el código completo empleado tanto para la herramienta 1 como para la herramienta 2 se muestra en la Figura 6. En la Figura 7 se imprime pantalla de los resultados dados por la herramienta 1, y en la Figura 8 se dan los resultados que imprime la herramienta 2.



```
clear all
clc
G1=4;
G2=tf(1,[1 1]);
G3=tf([1 0],[1 0 2]);
G4=tf([1 0],conv([1 1],[1 4]));
H1=tf([4 2],[1 3 1]);
H2=tf(2,[1 0 0 14]);
P1=series(G2,G3);
P2=feedback(P1,H1);
P3=series(P2,G4);
P4=feedback(P3,H2);
P5=series(G1,P4)
```

Figura. 6. Código de solución del ejemplo 1, en el editor de la herramienta 1 y de la herramienta 2.



```
P5 =

          4 s^7 + 12 s^6 + 4 s^5 + 56 s^4 + 168 s^3 + 56 s^2

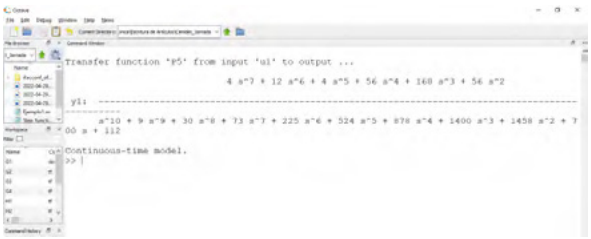
  ---------------------------------------------------------------

  s^10 + 9 s^9 + 30 s^8 + 73 s^7 + 225 s^6 + 524 s^5 + 878 s^4

                  + 1400 s^3 + 1458 s^2 + 700 s + 112

Continuous-time transfer function.
```

Figura. 7. Resultados del ejemplo 1 en la herramienta 1.



```
Transfer function 'P5' from input 'u1' to output ...

                  4 s^7 + 12 s^6 + 4 s^5 + 56 s^4 + 168 s^3 + 56 s^2

 y1:  ---------------------------------------------------------------

  s^10 + 9 s^9 + 30 s^8 + 73 s^7 + 225 s^6 + 524 s^5 + 878 s^4 + 1400 s^3 + 1458 s^2 + 7
  00 s + 112

Continuous-time model.
```

Figura. 8. Resultados del ejemplo 1 en la herramienta 2.

El seguimiento de los resultados permite expresar que se obtiene la misma relación de polinomios, por lo cual, los resultados son idénticos entre ambas herramientas computacionales.

Para el ejemplo 2, en la Figura 5 ya se mostró el código de solución, la gráfica de la respuesta y los valores de los datos solicitados; todos ellos realizados en la herramienta 2. Ahora, en la Figura 9 se muestran los resultados que genera la herramienta 1 para realizar la comparación.

ISSN en trámite

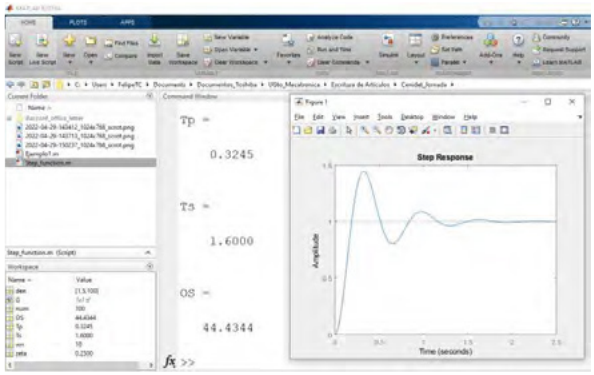


Figura. 9. Resultados del ejemplo 2 en la herramienta 1.

En comparativa, se aprecia que en la herramienta 2, el tiempo pico es de 0.32446 y en la herramienta 1 es de 0.3245. El tiempo de asentamiento es el mismo en ambos casos, y el porcentaje de sobretiro es calculado en 44.434 por la herramienta 2 y en 44.4344 por la herramienta 1. Respecto a las gráficas, se observa que la herramienta 1 no pone mallado en la Figura, mientras que en la herramienta 2 el mallado aparece de manera automática.

5. CONCLUSIONES

En la educación de la ingeniería, caso particular en cursos de ingeniería de control, el uso de herramientas computacionales facilita el proceso de enseñanza-aprendizaje. Sin embargo, el software que comúnmente es usado, es bajo licencia, y además requiere de un equipo de cómputo de gran capacidad de hardware que lo hace costoso. Como alternativa, se ha presentado una herramienta computacional de bajo costo que consiste en una minicomputadora en placa, Raspberry Pi 3B+, y software libre GNU-Octave.

En los ejemplos mostrados, se ha desarrollado la misma solución tanto en la herramienta computacional de computadora personal con Matlab™ como en la herramienta computacional de bajo costo y, los resultados en comparativa son los mismos, obteniendo los mismos valores numéricos y las mismas gráficas. Por tanto, es posible utilizar una minicomputadora en placa y software libre para la enseñanza de cursos de ingeniería de control en la educación de la ingeniería.

REFERENCIAS

ECE. (2020). Systems Control Engineering. NC State University. https://www.engineeringonline.ncsu.edu/course/ece-516-systems-control-engineering/

ECOVID-ED. (2020). Encuesta para la Medición del Impacto COVID-19 en la Educación. (s. f.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://www.inegi.org.mx/investigacion/ecovided/2020/#Documentacion

MIT. (2013). Systems and Control. https://ocw.mit.edu/courses/2-04a-systems-and-controls-spring-2013/pages/syllabus/

Nptel. (2021). NOC: Control systems, IIT Madras. https://nptel.ac.in/courses/107106081

Sarthak, A., y Goyal L. (2014). Raspberry Pi based interactive home automation system through Email. Presentado en el *International Conference on Optimization, Reliabilty, and Information Technology (ICROIT)*. Faridabad, India.

RPi. (2018). Raspberry Pi 3, Model B data sheet. [En línea]. Disponible en https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf. Consultado en: Abril 17, 2022.

Octave. (2022). GNU Octave. https://www.gnu.org/software/octave/

ISSN en trámite

Evaluación del desempeño docente desde la perspectiva de los estudiantes de Educación Superior

Mónica L. Acosta Miranda*, Julio Pérez Machorro, Leonor Ángeles Hernández*****

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Cuautla, Yecapixtla, Morelos. 62826 México
(Tel: 777-327-1780; e-mail: monica.acosta@cuautla.tecnm.mx, ** julio.perez@cuautla.tecnm.mx, ***leonor.angeles@cuaulta.tecnm.mx

Abstract: La pandemia derivada del Covid-19 derivó en cambios radicales en todas nuestras actividades y la educación superior no fue ajena a ellos. Dichos cambios tuvieron consecuencias y hacer una evaluación de ellas resulta importante para continuar avanzando. Este ejercicio de evaluación se basa en un análisis comparativo de los resultados de la Evaluación docente que se realiza cada semestre en los Institutos que integran el Tecnológico Nacional de México, específicamente en el campus Cuautla, revisando los semestres de enero-junio 2018 a agosto-diciembre 2021, considerando los indicadores del instrumento. Dicha comparación mostró una baja en los puntajes de cada una de las dimensiones evaluadas en el semestre enero-junio 2020, con una recuperación considerable en el periodo siguiente. Los resultados permiten concluir que existe disposición y capacidad de adaptación a situaciones extremas e los docentes y estudiantes en la institución.

Keywords: Evaluación docente, indicadores, perspectiva estudiantil, contingencia sanitaria

1. INTRODUCCIÓN

Si bien los retos que enfrentaba la educación superior antes de la pandemia ya eran significativos, el confinamiento que se vivió a nivel mundial dio un giro a la forma de enseñar, obligándonos a trabajar de manera virtual sin considerar si estudiantes y docentes contaban con los recursos necesarios para hacerlo. La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2022) menciona que dicha situación "afecto al 91% de los estudiantes en todo el mundo" complicando el logro de las metas establecidas en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 Educación de Calidad, respecto a asegurar el acceso igualitario a educación superior de calidad que permita acceder al empleo, el trabajo decente y el emprendimiento.

Tratando de minimizar el impacto de la Contingencia, las Instituciones de Educación Superior (IES) se vieron obligadas a asumir responsabilidades y tomar decisiones para continuar funcionando y encontrar rápidamente una nueva forma de trabajo. Para ello era necesario mejorar los canales de comunicación con la comunidad disponiendo de diferentes recursos para dar continuidad a las actividades educativas, mediante plataformas, dispositivos o equipamiento, acceso a bibliotecas y fuentes de referencia digitales y la realización de tutoriales para agilizar la educación tecnológica de la comunidad en general.

Con todo esto, el año 2020 significó un gran cambio, una exigencia inmediata de transformación digital, convirtiendo a la tecnología en parte del proceso. En el año 2021 ya nos encontrábamos más familiarizados con la educación a distancia y las plataformas virtuales y, conforme avanza el 2022 poco a poco se han ido retomando algunas actividades de manera presencial, por lo que se considera importante realizar un análisis sobre lo que deja la pandemia respecto a la gestión académica de la institución, identificando aquellos aspectos que se vieron fortalecidos o debilitados y los desafíos por enfrentar; todo esto tomando como base la percepción de los estudiantes respecto a la forma como los docentes abordaron la contingencia sanitaria en el desarrollo de sus actividades y en función del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Para entrar en contexto se revisan los conceptos relacionados con la evaluación docente y su importancia.

1.1 Evaluación docente

Los sistemas de evaluación son necesarios en toda institución para mejorar sus procesos y alcanzar sus estándares de calidad. Para lograr los objetivos estratégicos, las instituciones deben diseñar sus sistemas de evaluación a la medida por medio del análisis de su contexto y de las condiciones internas que pudieran estar relacionadas (Carranza y otros, 2021).

De acuerdo con la Real Academia Española, el término evaluar proviene del francés *évaluer* y significa "señalar el valor de algo" (RAE, 2022), por lo prácticamente todo es evaluable.

ISSN en trámite

Evaluar es parte de la docencia y en tiempos de cambio, como los generados por la pandemia, se convierte en una actividad indispensable para realizar un diagnóstico de cómo se ha desarrollado el proceso de enseñanza-aprendizaje. Realizar la evaluación del proceso educativo proporciona resultados útiles para todos los que participan en él, y dichos resultados apoyan la toma de decisiones y ayudan a enfrentar los problemas buscando un mejor ambiente académico y laboral.

En el proceso educativo es posible evaluar diversos aspectos como el nivel de aprendizaje logrado por los estudiantes, el desempeño de los docentes, así como a la institución en general. Para que estas evaluaciones logren la validez y certeza requeridas deben realizarse de manera conjunta, considerando todos los indicadores que permitan conocer las causas y efectos y, de esta manera, estar en condiciones de diseñar proyectos de mejora que impacten y solucionen aquellos problemas detectados (Delgado, Vera, Castro, Robles, & Vélez, 2021).

Respecto a la evaluación del desempeño docente, es un ejercicio sistemático que se encuentra asociado a la opinión de los estudiantes. Resulta importante para elevar la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje, fortalecer la formación profesional de los docentes y alcanzar los objetivos organizacionales. Esto implica definir las dimensiones del perfil docente en el contexto institucional. Por lo anterior cada IES define sus criterios de evaluación y el tipo de encuesta de opinión a aplicar a sus estudiantes para valorar el desempeño y rendimiento de sus docentes (Villa, Espinoza, & Sandoval, 2021).

1.2 Evaluación docente en el TecNM

El TecNM es una institución de educación superior tecnológica con presencia en los 32 estados de la República Mexicana a través de sus 254 campus. A partir de 1992 ha evaluado el desempeño docente por medio de cuestionarios de opinión de los estudiantes (DGEST, 2006), y considera al docente una figura de suma importancia en el proceso educativo, ya que realiza diversas funciones como guiar, facilitar y asesorar el aprendizaje, creando las condiciones para que el estudiante construya su conocimiento y, al convertirse en profesionista, responda a las demandas sociales, contribuyendo al desarrollo del país.

Para lograr lo anterior, el docente debe contar con una serie de competencias como ser: humanista, competente, comprometido, creativo, innovador, con un alto sentido crítico que impulse la formación integral del estudiante mediante actividades de docencia, investigación, gestión académica, tutoría, vinculación y su propia formación.

Evaluar la efectividad de la docencia y determinar si las diversas actividades docentes se llevan a cabo con calidad es fundamental para detectar áreas de oportunidad y tomar decisiones académicas y administrativas y, al mismo tiempo, proporciona retroalimentación al docente, llevándolo a la mejora profesional y al compromiso en el logro de las metas institucionales (TecNM, 2016). El proceso de evaluación docente se realiza en tres etapas: 1) evaluación por parte de los estudiantes, 2) Autoevaluación y 3) Evaluación del jefe del departamento académico.

El presente trabajo se basa en un análisis de los resultados del instrumento mediante el cual los estudiantes evalúan a los docentes de cada una de sus asignaturas, considerando semestres anteriores a la contingencia sanitaria y hasta el semestre inmediato anterior, con la finalidad de determinar si con la pandemia y los cambios en las estrategias didácticas la percepción de los estudiantes sobre el desempeño de sus docentes tuvo cambios y cuáles fueron los indicadores que resultaron más afectados, todo esto con la finalidad de identificar las áreas de oportunidad y tomar las medidas necesarias que lleven a la mejora continua en la institución.

2. METODOLOGÍA

Como en la mayoría de las IES el confinamiento derivado de la pandemia obligo a cambiar los esquemas del proceso enseñanza-aprendizaje de un día a otro. En el campus Cuautla del TecNM todas las actividades académicas se desarrollaron en línea a partir del mes de marzo de 2020, dejando en libertad a cada docente de realizarlas de acuerdo con los medios, conocimientos y habilidades personales disponibles; en coordinación y consideración con los estudiantes. El TecNM puso a disposición de docentes y estudiantes tutoriales y plataformas que facilitaran la migración a los nuevos esquemas. En el periodo intersemestral de junio-julio 2020 se llevó a cabo el diseño de la plataforma de la institución y una capacitación intensiva sobre su manejo, buscando estandarizar el proceso. A partir de ese momento, las actividades asíncronas se encuentran albergadas en la plataforma Moodle y cada uno de los docentes decide la forma de comunicarse de manera síncrona con sus alumnos.

Han sido prácticamente dos años de cambio, los estudiantes de nuevo ingreso en 2020 y 2021 no conocen físicamente a sus docentes y compañeros. Algunos de ellos tuvieron que adaptarse primero a la forma de trabajo de su institución de nivel medio superior y posteriormente habituarse a la del tecnológico. Cambios y aprendizajes continuos que de una u otra forma generan impacto en los participantes en el proceso.

Para conocer el nivel de impacto de todo lo mencionado, se realizó un análisis comparativo, de manera completamente cuantitativa, tomando como fuente de información las evaluaciones docentes que se aplican en todos los campus del TecNM a los estudiantes, considerando los semestres enero-junio 2018 a agosto-diciembre 2021.

ISSN en trámite

3. RESULTADOS

El instrumento de la evaluación docente considera diez dimensiones que corresponden a nueve competencias docentes y una dimensión adicional relacionada con el grado de satisfacción del estudiante. Se integra de 48 items con una puntuación que va de 1 a 5 siendo el cinco la calificación más alta. Cada dimensión incluye de 3 a 8 enunciados. Regularmente se aplica en el mes anterior al cierre de cada semestre y se considera para su aplicación a toda la población estudiantil inscrita en cada uno de los periodos, sin embargo, no siempre se alcanza el 100% de respuestas.

La relación entre la población y las respuestas obtenidas para el análisis se muestran en la Tabla número 1.

Tabla 1. Población objetivo y respuestas obtenidas

Estudiantes	E-J 18	A-D 18	E-J 19	A-D 19	E-J 20	A-D 20	E-J 21	A-D 21
Inscritos	5579	6482	5806	7043	6392	7109	6342	6617
Evaluaron	5059	5871	5180	6373	5830	5780	5559	5155
Porcentaje	90.7	90.6	89.2	90.5	91.2	81.3	87.6	77.90

Elaboración propia con información del Sistema Integral de Información SII (http://sii.cuautla.tecnm.mx/)

Por otra parte, la planta docente evaluada se encontraba integrada, en cada uno de los semestres, como se indica en las cifras de la Tabla número 2.

Tabla 2. Planta docente por evaluar

	E-J 18	A-D 18	E-J 19	A-D 19	E-J 20	A-D 20	E-J 21	A-D 21
Docentes	104	98	101	109	116	121	116	118

Elaboración propia con información del Sistema Integral de Información SII (http://sii.cuautla.tecnm.mx/)

Analizando la información del instrumento, el primer indicador se refiere al dominio de la asignatura y cuestiona aspectos como: Explicación de los contenidos, relación de los contenidos de la asignatura con los de otras, atención a dudas, ejemplos o ejercicios vinculados con la práctica profesional, así como si se explica o se establece relación entre los contenidos y la actividad profesional. El puntaje obtenido en este indicador en cada uno de los semestres se muestra en la Figura número 1.

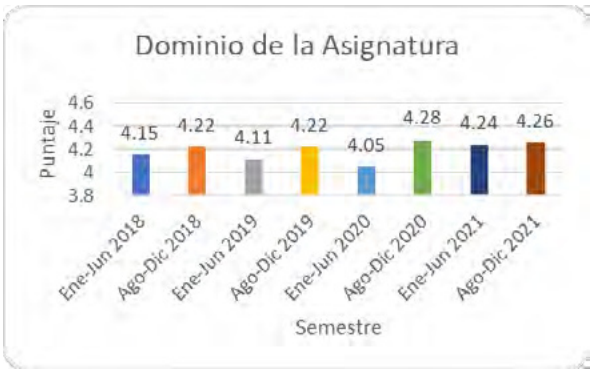


Figura 1. Dominio de la asignatura

Como se puede observar, todos los años la calificación baja en el semestre enero junio, siendo la menor en 2020 (4.05), pero se recupera en el siguiente periodo.

La siguiente dimensión se refiere a la planificación del curso que considera: Cumplimiento de acuerdos establecidos, el establecimiento de estrategias para lograr el aprendizaje deseado y el cumplimiento del programa de la asignatura en su totalidad. La Figura 2 muestra los resultados.



Figura 2. Planificación del curso

Las respuestas a este indicador presentan un comportamiento similar a los resultados del anterior, con puntaje más alto en agosto-diciembre 2020 y más bajo en enero junio del mismo año.

A su vez, los ambientes de aprendizaje se analizan considerando: realización de actividades en lugares diferentes al aula (lo que no fue posible en el confinamiento), uso de herramientas de interacción de las Tic's (contrario al anterior, indispensable en estos dos años), ejercicios de expresión oral y escrita, relación de los contenidos de la asignatura con la industria y la sociedad a nivel local, regional, nacional e internacional; inclusión de ejemplos y casos relacionados con la vida real. En la Figuran número 3 se muestran los resultados.

ISSN en trámite

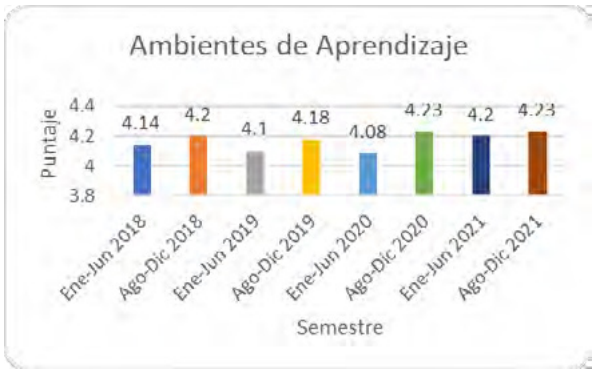


Figura 3. Ambientes de aprendizaje

El rubro estrategias, métodos y técnicas es otro de los aspectos a evaluar. En él se revisa lo relacionado con la adaptación de las actividades de acuerdo con los diferentes estilos de aprendizaje de los estudiantes, el fomento del autodidactismo, la reflexión y la investigación, la realización de actividades participativas, aceptar propuestas del grupo, organización y estructura de. las clases y el uso de diversas estrategias, métodos, medios y materiales. Los resultados se muestran gráficamente en la Figura 4.

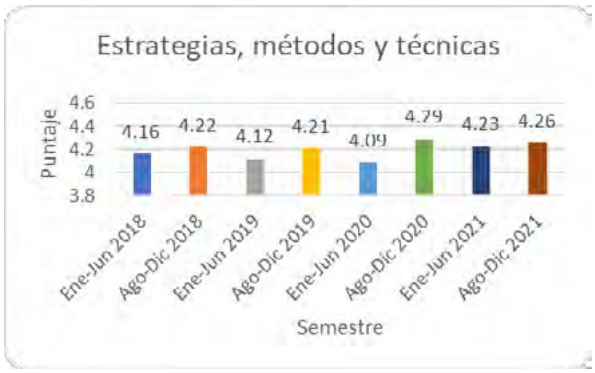


Figura 4. Estrategias, métodos y técnicas

Se puede decir que estos aspectos fueron los que más trabajo de adecuación y adaptación requirieron por parte de docentes y estudiantes, sin embargo, el comportamiento de las respuestas resulta similar a los anteriores.

La motivación, cuyos resultados se muestran en la Figura 5, evalúa aspectos como el compromiso y entusiasmo mostrado en la realización de las actividades, el desarrollo de un ambiente de respeto y confianza, considerar las necesidades, intereses y expectativas del grupo, propiciar la curiosidad y el deseo de aprender, reconocer los éxitos y logros de los estudiantes y, con todo esto, lograr despertar el interés por la asignatura.



Figura 5. Motivación

Comparando los resultados de este indicador con los anteriores, se puede observar que el puntaje alcanzado es el más bajo de todos y, aunque la cifra corresponde al primer semestre del 2020, se debe reconocer que es un tema sobre el cual se necesita trabajar más como docentes.

El instrumento contempla, de igual manera, el revisar la forma como el docente evalúa el aprendizaje de los estudiantes, considerando la forma como se identifican los conocimientos y habilidades, si se proporciona información para realizar adecuadamente las evaluaciones, si toma en cuenta otro tipo de actividades realizadas, la entrega de calificaciones en el plazo establecido, el hecho de otorgar oportunidad de mejorar los resultados, la apertura para la corrección de errores de apreciación y evaluación y el calificar de manera imparcial (Figura 6).

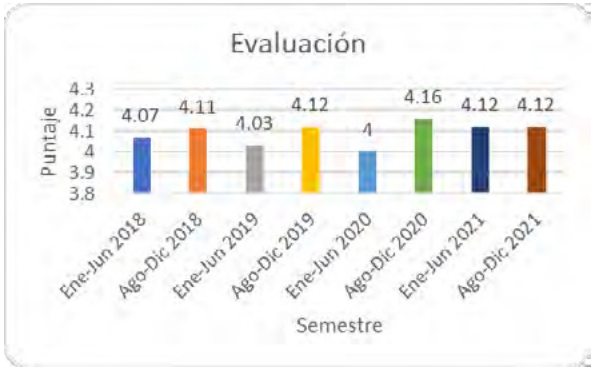


Figura 6. Evaluación

El comportamiento de los resultados presenta la misma tendencia que en los otros puntos, a diferencia de que no existe cambio en el puntaje en los dos últimos semestres. Se puede considerar que el trabajo en línea no permite diversificar en la forma de evaluar o el desconocimiento por parte de los docentes sobre algunos otros mecanismos de evaluación a utilizar de manera virtual.

ISSN en trámite

Si existe congruencia, desarrollo de un clima de apertura y entendimiento y el escuchar y considerar las opiniones de los estudiantes; son los aspectos que se analizan en el indicador Comunicación. Los resultados, mostrados en la Figura 7, son los segundos más altos después de la Planificación del curso.

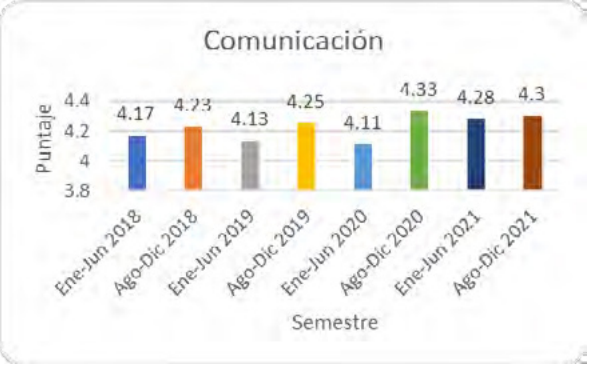


Figura 7. Comunicación

Buscando evaluar si el docente es responsable y equitativo en las actividades del curso, se cuestiona acerca de la puntualidad y asistencia a clases, el fomento de acciones que contribuyan a la conservación del medio ambiente considerando la limpieza y orden en las instalaciones y la disposición a brindar ayuda académica. Los resultados se encuentran en la Figura número 8 y permiten establecer una relación directa entre la planeación y la gestión del curso que puede ser la razón de resultados tan similares en ambos aspectos.

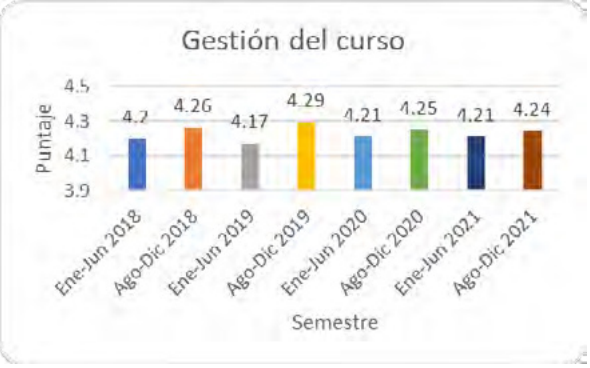


Figura 8. Gestión del curso

Uno de los aspectos con mayor impacto en estos dos años de contingencia fue el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación. El instrumento ha considerado el integrar su uso en el proceso de aprendizaje haciendo hincapié en el uso seguro, legal y ético de la información digital (Figura 9).

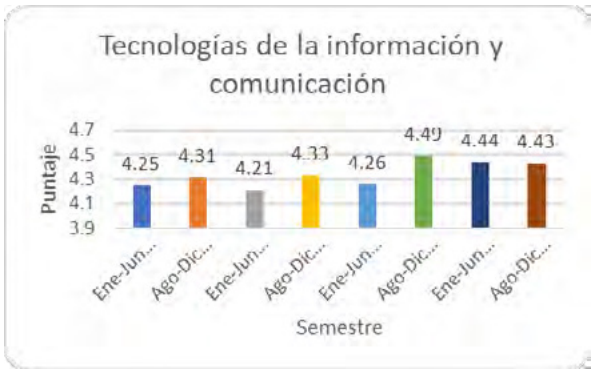


Figura 9. Tecnologías de información y comunicación

Como se puede observar en la Figura 9, de nueva cuenta el periodo agosto-diciembre 2020 es el que tiene el puntaje más alto y el indicador presenta el mayor puntaje de todos los indicadores. Si se considera que no todos los docentes tenían, antes de la contingencia, las mismas habilidades digitales y el verse obligados a llevar todas las asignaturas a esta forma de trabajo, la cifra muestra el trabajo responsable desarrollado por los docentes en respuesta a la situación imprevista vivida y que se hizo visible a los estudiantes.

La última dimensión que evalúa el cuestionario es la Satisfacción general e incluye opiniones directas sobre el docente y sobre el nivel de desempeño y aprendizaje logrado por el estudiante a través de la labor del docente.



Figura 10. Satisfacción general

En la Figura 10 se puede observar que la dimensión presenta poca variación en términos generales, con el mismo comportamiento de los otros 9 indicadores y con una variación menor entre periodos.

Como conclusión se puede decir que la calificación promedio, se ubica entre 4.09 y 4.28 lo cual, de acuerdo con lo que indica el instrumento es excelente. El periodo más bajo fue enero-junio 2020 y el más alto agosto-diciembre del mismo año. Lo

ISSN en trámite

anterior se atribuye a la Contingencia sanitaria y la falta de control en las actividades por lo inesperado de la situación. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la implementación de la Plataforma Moodle en la institución en el semestre agosto-diciembre 2020 "normalizó" las actividades.

De manera general la Figura 11 muestra el promedio general comentado.

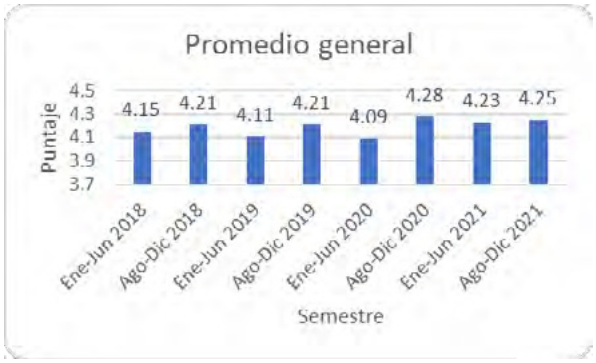


Figura 11. Promedio general

Estas cifras muestran el compromiso y dedicación de los docentes del campus Cuautla, así como la capacidad de adaptación a situaciones adversas y complicadas como la generada por la Contingencia Sanitaria. Sin embargo, se requiere continuar trabajando y motivando a docentes y estudiantes.

4. CONCLUSIONES

El confinamiento provocado por la pandemia de Covid-19 tuvo diversos efectos en el proceso educativo. En el caso de las generaciones de estudiantes que ingresaron a una nueva institución en el periodo 2019 a 2021, algunos de ellos no han tenido trato directo con sus compañeros y docentes y solo han socializado con ellos de manera digital.

El estudio a través de las tecnologías de la información y comunicación exigió a los estudiantes y docentes, el diseño de nuevas estrategias de organización del propio tiempo y el desarrollo de otras habilidades cognitivas, como la lectura y escritura, con la consabida dificultad de adaptación.

Los docentes debieron planificar sus clases de manera diferente, con contenidos que, en algunas ocasiones, no fueron diseñados para su desarrollo a través de plataformas digitales, lo que les generó mucho más trabajo en la búsqueda de nuevas formas para transmitir el conocimiento, dedicando tiempo para cursos de actualización docente y sobre las herramientas digitales.

El análisis comparativo de los resultados de la evaluación docente revela que, si bien se hizo necesario un periodo de rediseño y adaptación a las nuevas formas de enseñar y aprender, el trabajo se realizó y se ha dado continuidad a la labor educativa. El puntaje bajo ligeramente en los dos semestres de 2021, lo que pudiera llevar a pensar que fue producto de un cansancio acumulado por el ajetreo del 2020 o la falta de nuevas ideas a desarrollar. Habrá que continuar realizando este trabajo de análisis ahora que se ha trabajado en el modelo híbrido y revisar que pasa al regresar al regresar a las actividades presenciales, ya que son cambios y como seres humanos es necesario adaptarse a "la nueva normalidad".

REFERENCIAS

Carranza, A., Castro, S., & García, M. (2021). Evaluación de las funciones que desempeña el profesorado en educación superior tecnológica. *Revista Educación, 45*(2). doi:htt´://dx.doi.org/10.15517/revedu.v45i1.44372

Delgado, L., Vera, T., Castro, D., Robles, Y., & Vélez, A. (agosto de 2021). Evaluación docente durante la educación virtual en el sistema de educación superior. *MINERVA, Multidisciplinary Journal of Scientific Research, 2*(5), 98-104. doi:10.47460/minerva.v2i6.47

DGEST. (2016). Manual de los procesos de evaluación del desempeño docente y del ingreso de aspirantes a la educación superior tecnológica 2006-2007. CDMX, México: Dirección General de Educación Superior Tecnológica.

ONU. (2022). *Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos*. Recuperado el abril de 2022, de Objetivos de Desarrollo Sostenible: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/

RAE. (2022). *Diccionario de la Lengua Española*. Obtenido de Real Academia Española: https://dle.rae.es/

TecNM. (2016). *Manual de Autoevaluación para el profesor.* CDMX: Tecnológico Nacional de México.

Villa, C., Espinoza, S., & Sandoval, B. (2021). La Evaluación del Desempeño Docente desde la perspectiva del docente y de los administradores del proceso. (U. d. Sonora, Ed.) *Revista de Investigación Académica Sin Frontera, 14*(35), 1-25. doi: 10.46589/rdiasf.vi35.402



NUEVAS TENDENCIAS DE LA INGENIERÍA

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Simulación térmica FE para obtener parámetros óptimos de soldadura en unión disímil TWIP-SS 304L

Víctor García-García[a*1], Francisco Reyes-Calderón[a], Rogelio Vences-Hernández[a], Nereyda Alcantar-Mondragón[a], Sarahi Estrada-Hernández[b]

[a]Departamento de Metal Mecánica, Posgrado en Metalurgia/Doctorado en Ciencias en Ingeniería-Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, 58120 Morelia, Michoacán, México

[b]Departamento de Ingeniería Industrial-Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, 58120 Morelia, Michoacán, México

Abstract: El presente estudio aplicó un modelo numérico-experimental para determinar los parámetros óptimos de soldeo de una unión disímil entre el acero de plasticidad inducida por maclaje (TWIP) y el acero inoxidable (SS) austenítico AISI 304L mediante el proceso de arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protegido con gas (GTAW) pulsado. Para validar las estimaciones de simulación de elemento finito (FE) se produjeron uniones disímiles con aporte térmico bajo, alto y óptimo. Posteriormente, la unión de parámetros óptimos fue caracterizada metalográfica y mecánicamente. El acero TWIP incrementó la disipación de calor desde la zona de fusión (FZ) hacia la zona afectada térmicamente (HAZ) debido a la formación de dendritas columnares gruesas. La caracterización mecánica de la unión soldada mostró buenas propiedades mecánicas, a pesar de la microestructura heterogénea.

Palabras clave: Soldadura disímil, acero TWIP, acero AISI 304L, optimización, FE

1. INTRODUCCIÓN

Las uniones disímiles entre aceros presentan diversos problemas como diferencias en las composiciones químicas, formación de segundas fases indeseables **[1]** y variaciones de las propiedades mecánicas y termofísicas **[2]**. El problema es crítico cuando se trata de aceros avanzados ya que éstos son altamente sensibles al aporte térmico **[3]**. Por ejemplo, las uniones soldadas de acero TWIP suelen exhibir agrietamiento en caliente en la zona de fusión (FZ) y agrietamiento por licuación en la zona afectada térmicamente (HAZ) así como segregación de C y Mn **[3-4]**.

Por otro lado, las uniones disímiles aumentan la flexibilidad de los procesos de diseño y fabricación **[5]**. Particularmente, la unión entre acero TWIP y SS 304L puede contribuir a solucionar el problema de la baja resistencia a la corrosión del acero TWIP debido a la combinación de ambos materiales en la FZ y la difusión de elementos (C, Cr, Mn y Ni) **[6].**

Un aspecto clave para resolver la problemática de uniones disímiles es la determinación de un aporte térmico óptimo. Algunas investigaciones aplicaron procesos probabilísticos para establecer condiciones óptimas de soldeo. Por ejemplo, **Nagesh et al. [7]** aplicaron un diseño experimentos y redes neuronales para predecir la geometría óptima del cordón de soldadura (ancho y profundidad de penetración) y reducir la afectación térmica. **Tarng et al. [8]** optimizaron la geometría del cordón de soldadura mediante el método Taguchi, lo cual permitió analizar el efecto de cada parámetro del proceso.

Una de las mejores alternativas para establecer condiciones óptimas de soldadura es el uso de soluciones numéricas de elemento finito combinadas con diseños experimentales estadísticos como informaron en **[9]**.

En este trabajo se aplicó un método numérico-experimental para estimar parámetros óptimos de soldeo en la unión autógena disímil TWIP-SS 304L obtenida mediante el proceso GTAW pulsado. El problema térmico transitorio de soldadura fue resuelto numéricamente mediante FE. Posteriormente, tres uniones fueron realizadas para demostrar la efectividad de las estimaciones numéricas aplicando aportes térmicos alto, bajo y óptimo. Los parámetros óptimos proporcionaron

ISSN en trámite

alta microdureza en las regiones críticas de soldadura (FZ y HAZ).

2. PROCEDIMEINTO EXPERIMENTAL

El acero TWIP (Fe-22Mn-0.57C-1.2Si-1.8A %wt.) recibió un tratamiento termomecánico de laminación en caliente (reducción de espesor del 60%) y un tratamiento térmico de solubilizado a 1100°C durante 30 min seguido de un temple en agua. Mientras que, el SS austenítico AISI 304L (Fe-0.34C-18.3Cr-8.2Ni-1.1Mn %wt.) fue una placa comercial de 6.3 mm de espesor. Los parámetros de soldadura probados a partir del modelo numérico FE se indican en la **Tabla 1**. Estos parámetros fueron seleccionados tomando como referencia uniones autógenas símiles de acero TWIP y SS 304L libres de defectos **[10]**.

Tabla 1. Parámetros de soldeo del proceso GTAW pulsado evaluados por el modelo numérico FE.

Prueba	I (pulse, A)	I (base, A)	V (V)	Velocidad (mm/s)	Aporte térmico (J/mm)
1	105	40	12	0.68	757
2	110	40	12	0.69	776
3	115	40	12	0.71	787
4	125	40	12	0.72	825
5	130	40	12	0.71	860

Las uniones de bajo y alto aporte térmico (pruebas 1 y 5), así como la unión de parámetros óptimos (según modelo FE) fueron realizadas a través del proceso semiautomático GTAW-P. El proceso de soldadura se ejecutó en dos pasadas en modo autógeno (WJ-A).

La unión óptima fue caracterizada microestructuralmente. Primero, se realizó desbaste mecánico con lijas de SiC de distinta granulometría (320 hasta 2000). Posteriormente, el pulido de las probetas se realizó con una mezcla de 10 g de alúmina, 100 ml de agua purificada, 10 gotas de ácido fluorhídrico y 10 gotas de ácido nítrico. Finalmente, la microestructura fue revelada aplicando ataques químicos por inmersión en cloruro férrico para el lado del acero TWIP (durante 180 s) y agua regia (1 ml agua, 1.5 ml ácido nítrico, 4 ml de ácido clorhídrico) en el lado del SS 304L (durante 50 s).

La prueba de microdureza corroboró las buenas propiedades mecánicas de la unión óptima. El ensayo de microdureza post-soldadura se realizó de acuerdo con la norma ASTM E384 empleando el microdurómetro MITUTOYO® MVK-HVL acoplado al videoline micrometer VL-101. Una carga de 0.1 kgf fue aplicada durante un tiempo de 15 s.

2. MODELO NUMÉRICO

La distribución de temperaturas (T) se estimó a partir de la solución numérica FE de la ecuación no lineal de difusión de calor en estado transitorio (**Ec. 1**). El modelo térmico FE se resolvió computacionalmente utilizando el software comercial ANSYS Mechanical®.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \qquad (1)$$

Las consideraciones aplicadas al modelo matemático fueron los siguientes:

1.- El término de generación volumétrica de calor ($\dot{q}$) en la **Ec.1** fue de tipo doble elipsoidal de acuerdo con **Goldak et al. [11]**. La representación matemática de la fuente de calor para los elipsoides trasero y delantero fue:

$$q_{f,r}^{\cdot} = \frac{6\sqrt{3} f_{f,r} Q}{a b c_{f,r} \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\left({x^2}/{a^2} + {y^2}/{b^2} + {(z - v(t-\tau))^2}/{c_{f,r}^2}\right)\right) \qquad (2)$$

donde x, y y z son las coordenadas locales del modelo de doble elipsoide alineado con la línea central de soldadura. Además, se consideró la velocidad de soldadura (v), la energía proporcionada por el arco eléctrico ($Q = \eta VI$) y un tiempo de retardo (τ). Mientras que, los factores de ponderación ff =1.4 (parte frontal) y fr=0.6 (parte posterior) representan la fracción del calor depositado en los elipsoides delantero y trasero. Los parámetros geométricos de la fuente de calor son a (ancho del cordón), b (penetración del cordón), c_f (eje longitudinal trasero del cordón) y c_r (eje longitudinal delantero del cordón).

2.- Las propiedades tales como conductividad térmica (k), densidad (ρ) y el calor específico (Cp) se consideraron variables con la temperatura para ambos materiales y fueron tomadas de **[10]**. De acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Acero TWIP

$$k = 15.787 + 0.0135T \qquad (3)$$

$$\rho = 7545.5 - 1.03T + 9.72 \times 10^{-4} T^2 - 5.6 \times 10^{-7} T^3 \qquad (4)$$

ISSN en trámite

$$Cp = 635 + 3229e^{\left(-2\left(\frac{T-1340.3}{66.23}\right)^2\right)} \quad (5)$$

Acero AISI 304L

$$k = 4 \times 10^{-6}T^2 + 8.9 \times 10^{-3}T + 14.22 \quad (6)$$

$$\rho = 2 \times 10^{-7}T^3 - 5 \times 10^{-4}T^2 - 0.213T + 7899.9 \quad (7)$$

$$C_p = -3 \times 10^{-5}T^2 + 0.21T + 466.06 \quad (8)$$

3.- La temperatura inicial (T_0) fue la temperatura ambiente (T_0=T∞= 25°C para t=0). La segunda pasada de soldadura se realizó hasta que el ensamble alcanzó el equilibrio térmico con la temperatura ambiente. Las pérdidas de calor al ambiente por convección ($k\nabla T = h(T - T_\infty)$) y radiación ($k\nabla T = \varepsilon\sigma_a(T^4 - T_{alr}^4)$) se consideraron como condiciones de frontera en todas las superficies de ambos materiales.
La malla FE utilizada para el modelo térmico estuvo formada por 40 680 elementos hexaédricos tipo SOLID90 y 17 525 nodos. Los tamaños de los elementos transversales a la dirección de soldadura (FZ y HAZ) fueron de 0.25 mm y 0.5 mm, respectivamente. Las estimaciones numéricas de la temperatura presentaron variaciones inferiores al 5% con los tamaños de malla seleccionados (análisis de independencia de malla). La métrica de la malla se midió considerando los promedios de la calidad del elemento (0.46), la relación de aspecto (5.07), la asimetría (0.005) y la calidad ortogonal (0.978). El método completo de Newton-Raphson fue aplicado en ANSYS Mechanical® para resolver el problema térmico no lineal.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **Fig. 1** muestra la penetración y el ancho de soldadura estimados para diferentes valores de aporte térmico. A través de estos resultados se determinó que la prueba 3 produjo el cordón de soldadura con las mejores características geométricas.

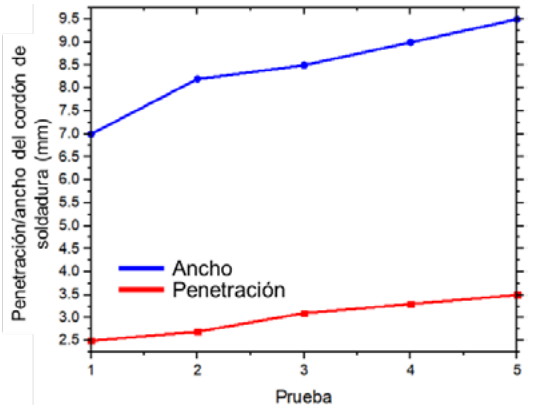


Fig. 1. Estimaciones FE de penetración y ancho (basadas en la temperatura de fusión de ambos materiales) con los parámetros de soldeo definidos en la **Tabla 1**.

Para corroborar los resultados de simulación FE se realizaron 3 uniones disímiles con aporte térmico bajo (757 J/mm), alto (860 J/mm) y óptimo (787 J/mm) según la **Tabla 1**. La **Figura 2** muestra las macrografías de la sección transversal en cada unión y la estimación de temperaturas FE. Cabe señalar que la acumulación de calor se cargó hacia el SS 304L debido al modo de distorsión. No obstante, la extensión de la HAZ fue mayor en el acero TWIP que en el SS 304L en ambas uniones. La HAZ alcanzó extensiones de 8 mm (acero TWIP) y 4 mm (SS 304L) demostrando la alta sensibilidad del acero TWIP a la afectación térmica.

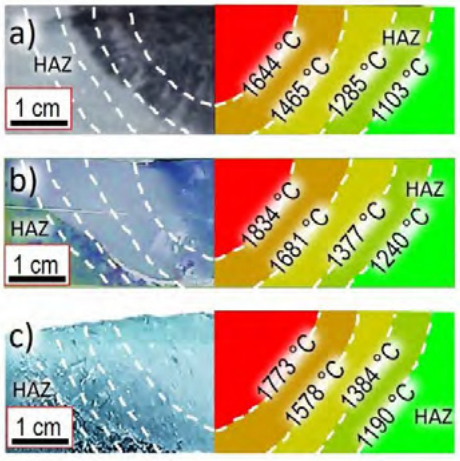


Fig. 2. Estimaciones FE de temperaturas vs macrografías de los cordones de soldadura (sección transversal) obtenidos con aporte térmico: a) bajo (757 J/mm), b) alto (860 J/mm) y c) óptimo (787 J/mm),

ISSN en trámite

La **Fig. 3** muestra micrografías LOM tomadas de la FZ y HAZ en la unión realizada con parámetros óptimos (787 J/mm). Algunos *stringers* de ferrita delta remanente se formaron en los granos austeníticos de la HAZ cercanos a la FZ (**Fig. 3a**). También se observó una prominente zona sin mezclar (UMZ) compuesta de ferrita delta semi-continua (**Fig. 3a**), lo que indica que el BM se fundió y posteriormente, resolidificó. La ferrita delta observada en la UMZ fue evidencia del modo de solidificación ferrítico-austenítico (FA) del lado SS 304L.

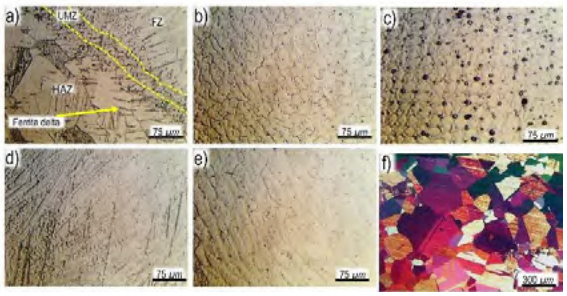


Fig. 3. Micrografías LOM tomadas de las regiones críticas de soldadura en: a) FZ-HAZ (lado SS 304L), b) centro de la FZ, c) FZ (lado SS 304L), d) FZ (lado acero TWIP), e) FZ-HAZ (lado acero SS 304L), f) Microestructura HAZ (lado acero TWIP).

En el centro de la FZ se observó solidificación totalmente austenítica (A) con crecimiento dendrítico-equiaxial (**Fig. 3b**). Previamente, **García-García et al. [12]** también reportaron un crecimiento dendrítico en uniones autógenas de acero TWIP-Ti soldadas con diferentes aportes de calor. Mientras que, algunas islas globulares interdendríticas de ferrita delta fueron observadas en el centro de la FZ del segundo pase de soldadura (**Fig. 3c**) indicando un modo de solidificación austenítico-ferrítico (AF). En ambos lados, SS 304L y acero TWIP-Ti, se detectó crecimiento columnar dendrítico (**Figs. 3d-e**) similar al reportado por **Casalino et al. [5]** en la unión disímil TWIP/SS 316L. La **Fig. 3f** mostró la microestructura heterogénea, en cuanto a tamaño de grano, que se formó en la HAZ. Esta microestructura estuvo compuesta por granos gruesos y finos (**Fig. 3f**).

4.1 Microdureza

La **Fig. 4** muestra los perfiles de microdureza medidos en los cordones de soldadura y en las regiones críticas (FZ, HAZ y BM). En ambos pases de soldadura, la HAZ del acero TWIP-Ti mostró un patrón errático en las mediciones causado por la combinación de granos finos y gruesos detectados en esta región (**Fig. 3f**). El aumento de la microdureza en la FZ estuvo asociado con la formación de granos dendríticos equiaxiales (**Figs. 3b-c**).

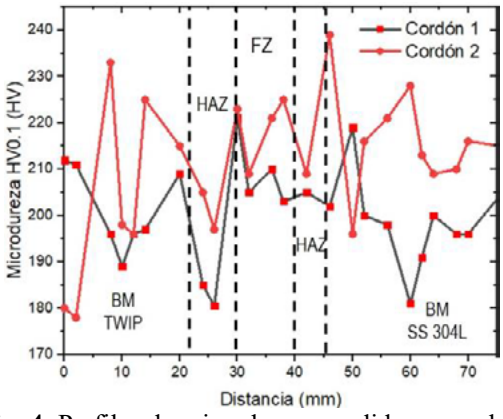


Fig. 4. Perfiles de microdureza medidos en ambos cordones de soldadura (óptima).

El crecimiento de grano en la HAZ del primer pase de soldadura (lado SS 304L) produjo una reducción de la microdureza (**Fig. 4**). Mientras que, el recalentamiento causado por el segundo pase de soldadura promovió una distribución más homogénea del tamaño de grano en la HAZ del SS 304, lo cual causó el aumento de la microdureza (**Fig. 4**).

5. CONCLUSIONES

El análisis de la unión disímil TWIP-Ti/SS 304L proporcionó las siguientes conclusiones.

1.- La selección de parámetros óptimos para el proceso GTAW-P ayudó a reducir el aporte térmico y mejorar las características geométricas del cordón de soldadura (penetración/ancho).
2.- Se produjo el modo de solidificación AF característico de ambos materiales en uniones símiles. El centro de la FZ fue totalmente austenítico y se produjeron trazas de ferrita delta en la FZ-HAZ debido a las altas velocidades de enfriamiento. Las dendritas columnares fueron más gruesas hacia el lado del acero TWIP-Ti, lo cual aumento la disipación de calor.
3.- En el centro de la FZ, los granos dendríticos equiaxiales elevaron la microdureza. Por otro lado, la región dendrítica gruesa observada hacia la interfaz FZ-HAZ de ambos lados produjo una microdureza menor.
4.- El aumento de dureza en la HAZ de lado del acero TWIP estuvo relacionado con la reducción

ISSN en trámite

del tamaño de grano grueso promedio. Mientras que, la dureza de la HAZ del SS 304L disminuyó debido al crecimiento de grano.

REFERENCIAS

[1] Angelastro, A., Casalino, G., Perulli, P., Spena, P.R. (2018). Weldability of TWIP and DP steel dissimilar joint by laser arc hybrid welding with austenitic filler. *Procedia CIRP*, 67, 607-611.
[2] Khalifeh, A.R., Dehghan, A., Hajjari, E. (2013). Dissimilar joining of AISI 304L/St37 steels by TIG welding process. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26(6), 721-727
[3] Roncery, L. M., Weber, S., and Theisen, W. (2012). Welding of twinning-induced plasticity steels. *Scripta Materialia*, *66*(12), 997-1001.
[4] Yoo, J., Kim, B., Park, Y., Lee, C. (2015). Microstructural evolution and solidification cracking susceptibility of Fe–18Mn–0.6 C–x Al steel welds. *Journal of Materials Science,* 50(1), 279-286.
[5] Casalino, G., Angelastro, A., Perulli, P., Posa, P., Spena, P.R. (2019). Fiber laser-MAG hybrid welding of DP/AISI 316 and TWIP/AISI 316 dissimilar weld. *Procedia CIRP*, 79, 153-158.
[6] Chen, L., Zhao, Y., Qin, X. (2013). Some aspects of high manganese twinning-induced plasticity (TWIP) steel, a review. Acta *Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26(1): 1-15.
[7] Nagesh, D.S. and Datta, G.L. (2010). Genetic algorithm for optimization of welding variables for height to width ratio and application of ANN for prediction of bead geometry for TIG welding process. *Applied Soft Computing*, 10(3);897–907.
[8] Tarng, Y.S. and Yang, W.H. (1998). Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 14**,** 549–554.
[9] Mohammadi, M., Golabi, S. and Amirsalari, B. (2021). Determining optimum butt-welding parameters of 304 stainless-steel plates using finite element, particle swarm and artificial neural network. *Iran Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering,* 45**,** 787–800.
[10] García-García, V., Mejía, I., Reyes-Calderón, F. (2018). Comparative study on weldability of Ti-containing TWIP and AISI 304L austenitic steels through the autogenous-GTAW process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(9): 2365-2376.
[11] Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical transactions B*, 15; 299–305.
[12] García-García V, Mejía I, Reyes-Calderón F. (2018). Experimental and FEM study of Ti-containing TWIP steel weldability. *Journal of Materials Processing Technology*, 261; 107-122.

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada
Volumen 5, Núm. 1, Enero - Junio 2022

ISSN en trámite

Aplicación de la técnica PSO a un modelo de Sistema fotovoltaico en modo isla e interconectado

Omar Y. Medina-Sánchez * **Francisco J. Goméz-González** **
Iván Valencia-Sálazar ** **Felipe Rodríguez-Valdés** **
José A. Hernández-Reyes **

* *Autor de Contacto. Dirección de correo electronico: M20020003@veracruz.tecnm.mx*
** *Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Tecnológico Nacional de México, campus Veracruz, Calzada Miguel Ángel de Quevedo 2779, Veracruz, Veracruz. C.P. 91860 México*

Abstract: El articulo presenta la optimización de un sistema fotovoltaico utilizando la técnica de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) en dos posibles configuraciones en modo isla o interconectado; buscando minimizar el costo de la energía, utilizando como parámetro de fiabilidad la probabilidad de pérdida de carga (LOLP). De ambos sistemas se obtiene un Costo de la Energía (COE) muy similar, siendo el del sistema aislado 2.9 $/kWh y 2.36 $/kWh para el sistema interconectado, esto nos da una mejor perspectiva sobre cuál de los dos sistemas es una mejor inversión para un sistema fotovoltaico.

Keywords: Optimización por ejambre de partículas, optimización, sistema fotovoltaico, COE, modelado .

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables surgen como una alternativa de los combustibles fósiles, debido a la limitada cantidad de este recurso y la contaminación que produce su utilización; cuya relevancia radica en ser una opción más limpia de generar energía eléctrica

Existen diferentes tipos de energías renovables como: solar, eólica, biomasa, hidroeléctrica y geotérmica; actualmente las que estan teniendo una mayor relevancia para la generación de energía eléctrica son la solar, eólica y fotovoltaica, aunque se presentan algunos problemas como la intermitencia en la generación.

Debido a la intermitencia que puede tener un sistema de generación con energía renovables, es común que se unan dos diferentes tipos de energía renovable en un solo sistema, con un tipo de energía a base de combustible fósil, a esto se le llama Sistema Hibrido de Energía Renovable (HRES).

Existen varios metodos para optimizar un HRES, entre los cuales se encuentran softwares de optimización como: Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER) e Hybrid Optimization by Genetic Algorithms (iHOGA), y técnicas de optimización como: algoritmo genético, Jaya, Harmony Search (HS), colonia de hormigas y optimización por enjambre de partículas (PSO).

En 1995 James Kennedy y Russell Eberhert desarrollaron el Algoritmo de optimización por enjambre de partículas.

El algoritmo se inspira en la evolución del comportamiento colectivo, principalmente tratando de imitar el comportamiento de varios grupos de animales como cardúmenes, parvadas, manadas, etc. Kennedy & Eberhart (2005)

Se han realizado múltiples investigaciones comparando diversas técnicas contra PSO, como es el trabajo de Fodhil et al. (2019), donde se compara contra HOMER para obtener el mejor dimensionado de un sistema compuesto por paneles fotovoltaicos, un generador diésel y un banco de baterías, buscando obtener el menor costo total del sistema para 20 viviendas; se llega a la conclusión que PSO es mejor tecnica debido a que da un costo de la energía (COE) de 0.38 $/kWh y unas emisiones de CO_2 de 1994.5 kg/Año, comparado con respecto a HOMER que arroja un COE de 0.4 $/kWh y unas emisiones de CO_2 de 2094 kg/año.

Alshammari & Asumadu (2020) compara PSO contra Jaya y Harmony Search, se implementan las técnicas para obtener el dimensionado óptimo de 4 posibles sistemas compuestos por paneles fotovoltaicos/turbinas eólicas/generador de biomasa/baterías. El mejor resultado es un sistema con un costo presente neto de $581,218, y un COE de 0.254 $/kWh.

ISSN en trámite

PSO en varias investigaciones ha demostrado ser una técnica muy confiable, debido a que no requiere de una gran potencia de computo, llega a buenos resultados en menor tiempo que otras técnicas y puede ser implementada en diversos lenguajes de programación.

La presente investigación optimizar un sistema fotovoltaico utilizando PSO, para obtener el menor COE en dos posibles configuraciones, aislado completamente de la red eléctrica de Comisión Federal de Electricidad o interconectado a la red eléctrica.

2. MODELO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA.

La configuración para el sistema aislado lo podemos observar en la Fig. 1, donde apreciamos que está compuesto por un bus de Corriente Directa (DC) donde se encuentra conectado el arreglo fotovoltaico y el banco de baterías, también contamos con un bus de Corriente Alterna (AC) donde se encuentra conectada la carga y el generador diésel como respaldo, para poder conectar el bus de DC con el de AC contamos con un inversor.

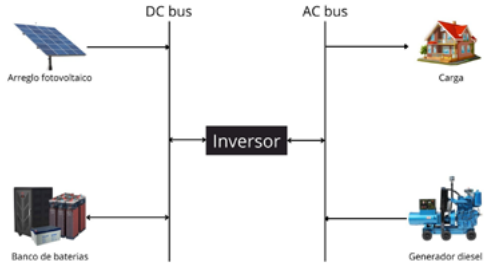


Fig. 1. Diagrama del sistema aislado

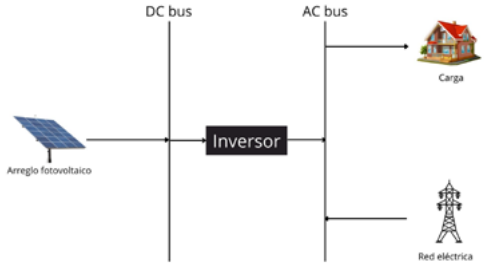


Fig. 2. Diagrama del Sistema interconectado

Como observamos en la Fig. 2, el sistema interconectado solo tiene conectado el arreglo fotovoltaico al bus de directa, la red eléctrica hace de respaldo para el sistema el cual está conectado junto a la carga al bus de alterna.

2.1 Arreglo fotovoltaico

Para simular de forma correcta el arreglo, es necesario proporcionarle la radiación solar en el sitio en lapsos de una hora durante un año, junto a la temperatura ambiente del lugar. De acuerdo a Alshammari & Asumadu (2020), la ecuación queda de la siguiente forma:

$$P_s = \sum_{t=1}^{8760} (P_{PFr} N_{PF} PF_{df})(\frac{G(t)}{G_{base}})(1 + K_T(T_c - T_{base}))(1)$$

$$T_c = (T_{amb}(t) + G(t) \times (\frac{NOCT - 20}{800}) \cdot 1000) \quad (2)$$

Donde:

P_{PFr} es la potencia nominal del panel (kW).
NPF es el numero de paneles fotovoltaicos.
PF_{df} es el factor de reduccion de potencial del panel fotovoltaico (0.8).
$G(t)$ es la radiacion en el plano inclinado (kW/m^2).
G_{base} es la radiacion solar en estado estandar ($1kW/m^2$).
K_T es el coeficiente de temperatura a maxima potencia.
T_c es la temperatura de la celda (°C).
T_{base} es la temperatura de referencia (°C).
$NOCT$ es la temperatura nominal de operacion de la celda (°C).

2.2 Banco de baterías

Para realizar el dimensionado del banco de baterías, es necesario realizar un análisis del ciclo de carga y descarga del banco, dependiendo de la hora especifica del día, se verificia si la energía producida por el arreglo fotovoltaico (P_s) puede suministrar o no toda la energía requerida por la carga (P_l).

En caso de que la energía generada por el arreglo fotovoltaico sea capaz de satisfacer la demanda de la carga, el estado de Carga (SOC) se calcula de la siguiente manera Askarzadeh & dos Santos Coelho (2015):

$$SOC(t) = SOC(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_s - \frac{P_l(t)}{\eta_{inv}}) \cdot \eta_{bc} \quad (3)$$

Donde: σ índice de auto descarga de la batería, η_{inv} es la eficiencia del inversor y η_{bc} es la eficiencia de carga de la batería.

En caso de que la energía generada por el arreglo fotovoltaico no sea capaz de satisfacer la demanda de la carga, el SOC se calcula de la siguiente manera Askarzadeh & dos Santos Coelho (2015):

$$SOC(t) = SOC(t-1) \cdot (1 - \sigma) - (\frac{P_l(t)}{\eta_{inv}} - P_s)/\eta_{bd} \quad (4)$$

La carga de las baterías no puede exceder el Máximo Estado de Carga de las baterías (SOC_{max}), por esto se considera la siguiente restricción:

$$SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (5)$$

Donde SOC_{max} toma el valor de la Capacidad Nominal del Banco de Baterías (C_{bb}) :

$$SOC_{max} = C_b N_{bat} \quad (6)$$

Donde: C_b es la capacidad nominal de cada batería y N_{bat} es el número de baterías.

ISSN en trámite

Para prolongar el tiempo de vida de la batería, se aplica otra restricción para asegurarnos de estar siempre por encima del Mínimo Estado de Carga (SOC_{min}):

$$SOC(t) \geq SOC_{min} \tag{7}$$

El SOC_{min} está dado por la máxima profundidad de descarga (DOD):

$$SOC_{min} = (1 - DOD) \cdot C_{bb} \tag{8}$$

2.3 Generador diésel

El consumo de combustible para un generador a diésel ($Cons_G$), está dado por (Dufo & Bernal , 2008):

$$Cons_G : \alpha_{DG} P_{DG}(t) + \beta_{DG} P_{DGr} \tag{9}$$

Donde: P_{DG} es la capacidad nominal,P_{DGr} es la generación promedio por hora, α_{DG} y β_{DG} son coeficientes de la curva de consumo.

3. FUNCIÓN OBJETIVO Y RESTRICCIONES

La función objetivo está determinada por el número de paneles fotovoltaicos, numero de baterías y si contara o no con un generador diésel (para el sistema aislado), la probabilidad de perdida de carga (LOLP) y el COE:

$$N_{PF}^{min} \leq N_{PF} \leq N_{PF}^{max}$$

$$N_{bat}^{min} \leq N_{bat} \leq N_{bat}^{max}$$

$$N_{G}^{min} \leq N_{G} \leq N_{G}^{max}$$

$$0 \leq LOLP \leq LOLP_{max}$$

$$COE_{min} \leq COE \leq COE_{max}$$

Para calcular el Costo Presente Neto (NPC) la ecuación utilizamos el costo de los componentes de la tabla 1 y la siguiente ecuación:

$$C_{NPC} = \sum_{n=0}^{N_p} (C_I(n) + C_R(n) + C_{O\&M}(n) + C_F(n)) \tag{10}$$

Donde:

N_p es el tiempo de vida del proyecto.
C_i es el costo inversión.
C_R es el costo de remplazo.
$C_{O\&M}$ es el costo de operación y mantenimiento.
C_F es el costo del combustible.

La ecuación para calcular el costo de inversión está dada por la cantidad de cada componente y su costo:

$$C_I = \sum N_{PF} C_{IPF} + N_{bat} C_{Ibat} + N_G C_{IG} + N_{in} C_{Iin} \tag{11}$$

La ecuación para calcular el costo de remplazo está dada por la cantidad de componentes, su costo de remplazo y la cantidad de remplazos a lo largo del proyecto:

$$C_R = \sum N_{bat} C_{Rbat} N_{Rbat} + N_G C_{RG} N_{RG} + N_{in} C_{in} N_{Rin} \tag{12}$$

El costo de Operación y Mantenimiento (O&M) la obtenemos de la siguiente ecuación:

$$C_{O\&M} = \sum N_{PF} C_{O\&MPF} + N_b C_{O\&Mb} + N_G C_{O\&MG} \tag{13}$$

Para calcular el costo del combustible utilizamos la siguiente ecuación:

$$C_F = Cons_G(t) DG_h P_f \tag{14}$$

Donde: DG_h son las horas de operación del generador durante el tiempo de vida del proyecto y P_f es el precio del diésel por litro.

Para verificar la fiabilidad del sistema empleamos la probabilidad de pérdida de carga (LOLP), el cual se calcula de la siguiente manera:

$$LOLP = \frac{\sum ENS}{\sum P_l} 100\% \tag{15}$$

Para calcular el costo de la energía empleamos la siguiente ecuación:

$$COE = \frac{C_{NPC}}{E_{total}} \tag{16}$$

Tabla 1. Costo de los componentes

Componente	Precio	O&M	Cr	Np	Nr
Panel fotovoltaico	$7210.28	1%	$7210.28	25 a	0
Trabajo civil	20%	1%	20%	25 a	0
Baterías	$14987.10	3%	$14987.10	20 a	1
Generador	$28113	3%	$28113	10 a	2
inversor	$2952.2	0%	$2952.2	10 a	2

4. METODO DE OPTIMIZACIÓN

Los diagramas de flujo asociadas a la simulación del comportamiento de los sistemas de las figuras 1 y 2, son detallados a continuación.

4.1 Diagrama de flujo sistema aislado

Para el sistema aislado se realiza el cálculo de la generación fotovoltaica en un tiempo determinado, se verifica si la generación satisface o no a la carga, en caso de existir un exceso de energía se carga el banco, por el contrario si el arreglo no logre satisfacer la carga, entra el banco de baterías como respaldo, si el banco puede suministrar la demanda faltante se descarga sin sobrepasar el SOC_{min}, en caso de requerir más energía entraría en operación el generador diésel, el diagrama de flujo se muestra en la figura 3.

ISSN en trámite

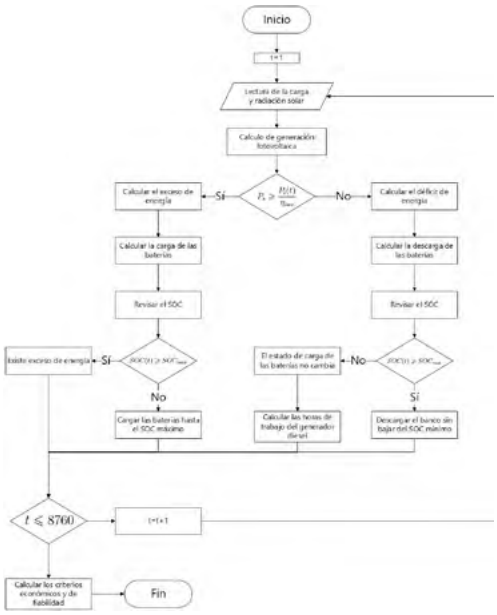


Fig. 3. Diagrama de flujo para el sistema aislado

4.2 Diagrama de flujo sistema interconectado

En el sistema interconectado se realiza el cálculo de la generación fotovoltaica, si la energía generada es mayor al de la carga entonces se inyecta el excedente a la red eléctrica, en dado caso que la energía generada no logre satisfacer la carga, se compra energía de la red eléctrica. El diagrama de flujo resultante lo vemos en la figura 4

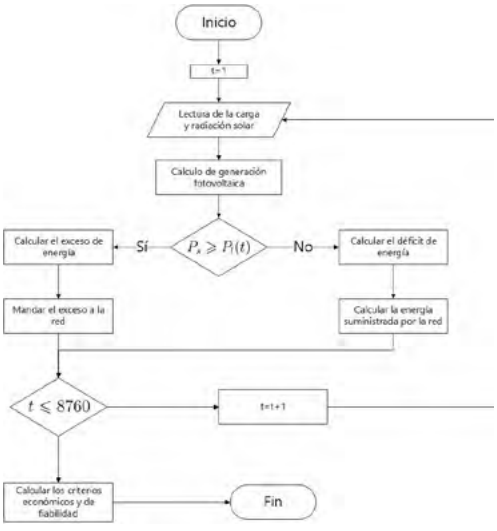


Fig. 4. Diagrama de flujo para el sistema interconectado

4.3 Diagrama de flujo de PSO

Como se observa en la Fig. 5 en cada partícula se calcula el flujo de energía del sistema, se compara cual es la mejor solución dentro de la población y se verifica si cumple con los criterios establecidos, en caso de no ser así, se actualiza el valor de la mejor partícula, y se repite el proceso hasta cumplir con los criterios.

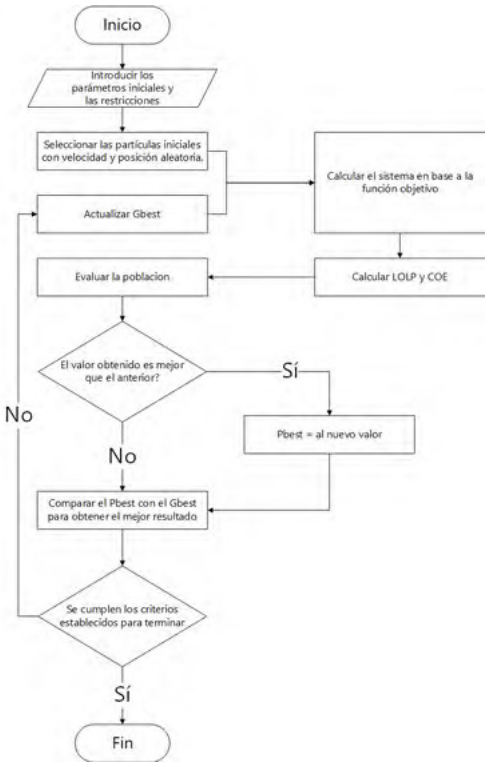


Fig. 5. Diagrama de flujo para el sistema interconectado

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones se realizaron con el software MATLAB R2019a. El sitio de estudio se encuentra en la localidad del hato con latitud 18.96 y longitud -96. Para las simulaciones se asume que la radiación y la temperatura ambiente son constantes en el periodo de tiempo determinado.

La fig. 6 muestra el promedio de carga de 1077W con picos de 1800W, la fig. 7 ilustra la radiación solar en el sitio, y la temperatura ambiente se muestra en la Fig.8. Todos los datos previamente mencionados fueron obtenidos de la base de datos de Renewable Ninja.

Para la optimización se utilizó una población (n) de 25 partículas, una masa de inercia (w) de 0.7298, una amortiguación (Wdamp) de 0.99, coeficiente personal de aprendizaje (c1) de 2.05, coeficiente global de aprendizaje (c2) de 2.05 y un numero de iteraciones de 35.

ISSN en trámite

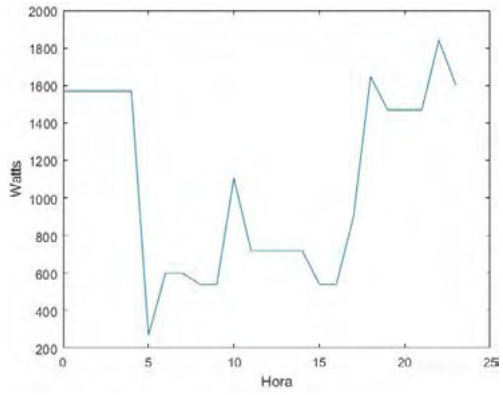


Fig. 6. Carga del sistema durante un día

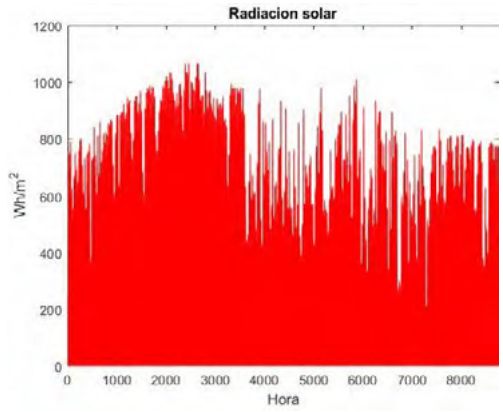


Fig. 7. Radiación solar en el sitio de estudio durante un año

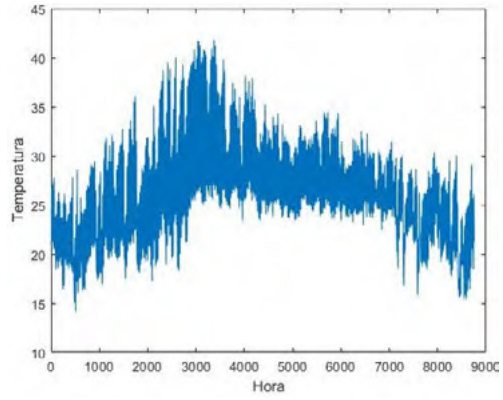


Fig. 8. Temperatura ambiente en el sitio durante un año

Como componentes del sistema se consideran paneles fotovoltaicos de 450W, las baterías de 400 Ah, el inversor de 2000W y un generador diésel con una capacidad de 2200W, los datos económicos ya fueron mostrados en la tabla 1.

En la simulación del sistema interconectado se considera que la venta del excedente de energía tiene el valor del consumo básico, y la compra de la energía tiene el costo del consumo excedente.

Al simular el sistema aislado obtenemos un COE de 2.9 $/kWh como se observa en fig. 9, el sistema está compuesto por 24 paneles fotovoltaicos, 17 baterías y 1 generador diésel, con una inversión inicial de $458,890. En el sistema interconectado se obtiene un COE de 2.364 $/kWh como se muestra en la fig. 10, con un sistema compuesto por 17 paneles fotovoltaicos y una inversión inicial de $118,320.

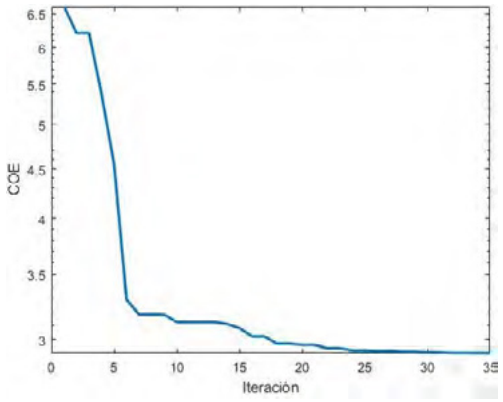


Fig. 9. COE del sistema aislado obtenido en la simulación

En la fig. 11 se muestra la generación anual del sistema aislado, con un total de 15378 kW y unas pérdidas de potencia de 4803 kW. El SOC de las baterías se mantiene como mínimo en un 30% como es mostrado en la fig. 12 y el consumo de combustible anual es de 80 litros, como observamos a detalle en la fig. 13.

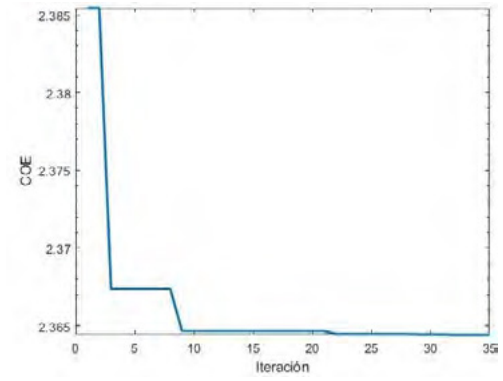


Fig. 10. COE del sistema interconectado obtenido en la simulación

El sistema interconectado genera un total de 10252 kW anuales como se observa en la Fig. 14, de los cuales 7233 kWh se entregan a la red de CFE y 7468 kWh son consumidos de la red.

ISSN en trámite

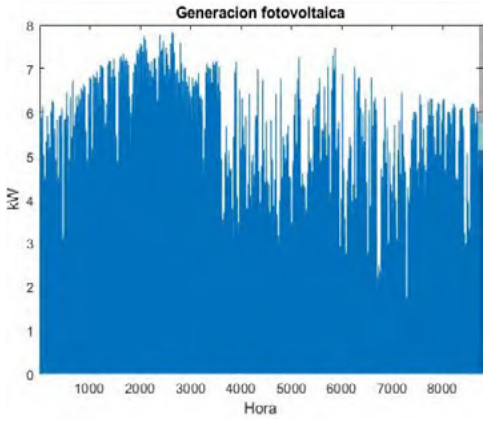


Fig. 11. Generación fotovoltaica del sistema isla

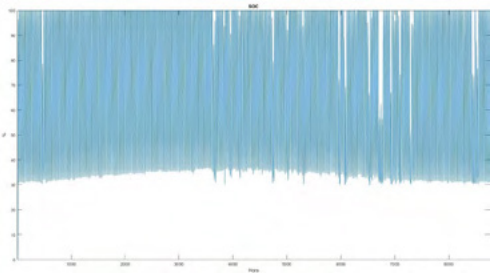


Fig. 12. SOC del sistema isla

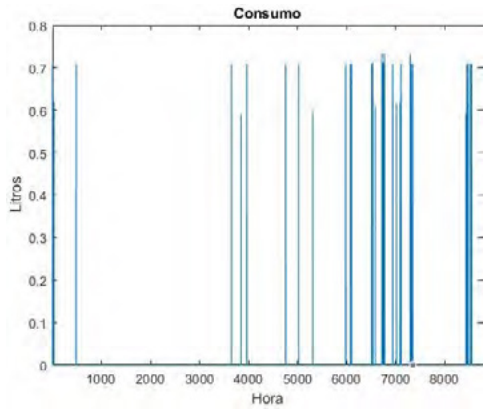


Fig. 13. Consumo de diésel del sistema isla

6. CONCLUSIÓN

Se estudió la optimización de un sistema fotovoltaico utilizando PSO, para un sitio apartado de la urbanización, el cual busca obtener el sistema donde el COE sea menor, comparando dos posibles configuraciones de sistemas.

Ambos sistemas dan como resultado un COE similar, con una diferencia de \$0.646. El sistema aislado necesita una mayor inversión inicial de \$458,890 en contra parte con los \$118,320 que se necesita el sistema interconectado.

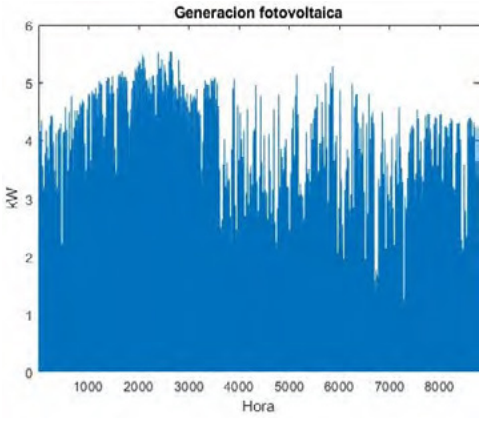


Fig. 14. Generación fotovoltaica del sistema interconectado

El sistema interconectado tiene una menor fracción renovable con respecto al sistema aislado, siendo 27.15% para el primero en comparación con los 98.96% del segundo.

El sistema interconectado genera altas cantidades de CO_2 durante la vida del proyecto siendo 98912.5 toneladas de CO_2 con respecto a las 17305.5 toneladas de CO_2 que se generan en el sistema aislado.

La mejor opción si se cuenta con un capital mayor de inversión inicial es el Sistema Aislado, debido a que las emisiones de CO_2 son menores, lo cual ayuda a la reducción de la contaminación a nivel global, y permite así dejar de lado la dependencia a los combustibles fósiles.

REFERENCIAS

Alshammari, N. & Asumadu, J. (2020). Optimum unit sizing of hybrid renewable energy system utilizing harmony search, Jaya and particle swarm optimization algorithms. *Sustainable Cities and Society, 60*, página 102255.

Askarzadeh, A. & dos Santos Coelho, L. (2015). A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran. *Solar Energ, 112*, páginas 383–396.

Dufo-López, R. & Bernal-Agustín, J. L. (2008). Multi-objective design of PV wind diesel hydrogen battery systems. *Renewable energy, 33*, páginas 2559–2572.

Fodhil, F., Hamidat, A. & Nadjemi, O. (2019). Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria. *Energy, 169*. páginas 613–624.

Kennedy, J. & Eberhart, R. (2005). Particle Swarm Optimization. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*.

Sharafi, M. & ELMekkawy, T. Y. (2014). Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. *Renewable energy,68*, páginas 67–79.

ISSN en trámite

Síntesis de nanopartículas semiconductoras de ZnO empleando *Anemopsis californica*

José Alejandro Villegas Fuentes*, Horacio Edgardo Garrafa Gálvez*, Priscy Alfredo Luque Morales*

**Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño- Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 22860, México, pluque@uabc.edu.mx*

Resumen: En el presente este trabajo se sintetizaron nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) mediante una metodología de síntesis verde en la que se empleó extracto de hierba del manso (*Anemopsis californica*). Las nanopartículas sintetizadas se caracterizaron por espectroscopía de IR en la que se encontró el enlace Zn-O en 820 cm^{-1}; además presentan una brecha energética (band gap) de 3.6 eV. Se realizaron pruebas de fotocatálisis mediante la degradación del colorante azul de metileno en la que se logró una degradación del 78% en 180 min bajo luz UV.

Palabras clave: ZnO, nanopartículas, azul de metileno, fotocatálisis, caracterización.

1.INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales son aquellos que cuentan con un tamaño menor a 100 nm, cada día ganan más interés entre la comunidad científica debido a su gran cantidad de aplicaciones como la medicina, electrónica, óptica, catálisis, entre muchas (Begum and Ahmaruzzaman, 2018). A lo largo de los años se han empleado múltiples óxidos metálicos para la formación de nanomateriales como lo son las nanopartículas, entre los que encontramos óxido de estaño (SnO_2), óxido de titanio (TiO_2), óxido de hierro (Fe_2O_3) (Silva-Osuna *et al.*, 2022). Entre estos óxidos metálicos destaca el óxido de zinc (ZnO) el cual es un semiconductor tipo n, que destaca por sus diversas propiedades como la capacidad de formar diversas estructuras, una amplio band gap con un valor de ~3.6 eV y una energía de enlace de excitación de 60 meV, no es tóxico, bajo costo y su alta eficiencia en procesos de fotocatálisis como la degradación de contaminantes orgánicos en aguas de desechos (Kalpana and Devi Rajeswari, 2018; Faisal *et al.*, 2021).

Las rutas de obtención de las nanopartículas es un punto crucial, existen métodos convencionales de síntesis como sol-gel, pirólisis, precipitación, hidrotermal, solvotermal, entre otros que incluyen el uso de reactivos tóxicos y la generación de desechos; por lo que la síntesis verde es una opción viable en la cual se emplean extractos de frutos, flores o plantas que gracias a moléculas como polifenoles o flavonoides, actúan como reductores y estabilizadores en el proceso de síntesis (Osuntokun, Onwudiwe and Ebenso, 2019). Entre los extractos empleados se encuentran: *Averrhoe carrambola* (Chakraborty *et al.*, 2020), *Syzygium cumini* (Sadiq *et al.*, 2021), *Solanum torvum* (Ezealisiji *et al.*, 2019) , entre otros. Un extracto no explorado es el *Anemopsis califórnica,* comúnmente llamada hierba mansa o hierba del manso; es una planta de la familia *Saurauraceae* nativa de la región sureste de Norte América que ha sido empleada gracias a sus propiedades medicinales y que posee actividad antimicrobiana. Esta planta crece en hábitats húmedos, salinos o alcalinos rodeados de desiertos. Dentro de su composición se pueden encontrar moléculas como limoneno, cimeno, timol, eucaliptol, entre otros (Medina *et al.*, 2005; Medina-Holguín *et al.*, 2008). Estas moléculas pueden actuar como agentes quelantes de algún precursor de Zn, posteriormente como estabilizadores y reductores durante el proceso de síntesis de nanopartículas permitiendo la formación deseada de las mismas (Soares *et al.*, 2020; Aldeen, Ahmed Mohamed and Maaza, 2022).

En el presente trabajo se sintetizaron nanopartículas de ZnO empleando extracto de *Anemopsis califórnica,* las cuales fueron analizadas por distintas técnicas de caracterización para determinar sus propiedades físicas, químicas y ópticas. Además, se realizaron pruebas de fotocatálisis mediante la degradación de azul de metileno bajo luz UV.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para la síntesis de nanopartículas de ZnO se utilizaron hojas de *Anemopsis californica* compradas de una tienda local, nitrato de zinc hexahidratado ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) como precursor de Zn con una pureza del 98% comprado de Sigma-Aldrich y agua desionizada. Para el proceso de fotocatálisis se empleó azul de metileno con un peso molecular de 373.9 g/mol y una pureza del 85% comprado de Sigma-Aldrich.

ISSN en trámite

2.2 Preparación del extracto

Se preparó el extracto a una concentración del 2% en una relación peso/volumen. Las hojas de la hierba del manso fueron añadidas a 50 ml de agua desionizada. La solución se dejó en agitación por 2 horas para hidratar de manera correcta las hojas y posteriormente se pasaron a un baño de agua a 60 °C por una hora, posteriormente se filtraron con un papel Whatman No. 4.

2.3 Síntesis verde de nanopaartículas

Para la síntesis de nanopartículas se siguió la metodología de Soto (2019) (Soto-Robles *et al.*, 2019). Al extracto previamente obtenido se le agregaron 2 gr de nitrato de zinc hexahidratado, posteriormente se dejó en agitación por 1 hora, después se colocó en un baño de agua por 12 horas hasta obtener una consistencia plástica. La muestra fue calcinada a 400 °C por 1 hora para finalmente ser recolectada y almacenada hasta su uso.

2.4 Actividad fotocatalítica

Para evaluar la actividad fotocatalítica de las nanopartículas sintetizadas se realizaron pruebas de degradación del colorante azul de metileno bajo luz UV. Para las degradaciones se agregaron 50 mg de nanopartículas de ZnO a una solución de 50 ml de azul de metileno con una concentración de 15 ppm, la solución se colocó en agitación en oscuridad por 30 min. Posteriormente las muestras se colocaron bajo luz UV en una lámpara de 10 W a 18 mJ/cm^3 durante 3 horas. Se tomaron muestras cada 10 minutos en la primera hora y cada media hora hasta un total de 3 horas.

2.5 Caracterización

Las muestras obtenidas fueron sometidas a distintas técnicas de caracterización. Empleando espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), con la finalidad de conocer la composición química y los grupos funcionales del extracto y las nanopartículas; para este análisis, se empleó un espectrofotómetro de IR de la marca Perkin con un análisis de 4500 cm^{-1} a 400 cm^{-1} en modo de transmitancia. Las propiedades ópticas, band gap y actividad fotocatalítica fueron analizadas mediante espectroscopia de ultravioleta-visible (UV-vis) usando un espectrofotómetro Perkin-Elmer usando un rango de 200-800 nm con una velocidad de escáner de 480 nm/min. Para conocer la estructura cristalina se realizó difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro Bruker D2, usando radiación Cu Kα, con un ángulo 2θ entre 10° y 80°.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 FTIR

El análisis de FTIR se realizó tanto al extracto de *Anemopsis californica*, como a las nanopartículas sintetizadas como se puede observar en la fig 1. En espectro del extracto podemos ver distintas bandas, en 3330 cm^{-1} se puede observar una banda que corresponde a las vibraciones del enlace –OH debida a la humedad en las muestras (Sharmila, Thirumarimurugan and Muthukumaran, 2019). En 2900 cm^{-1}, se observa una banda que corresponde a los estrechamientos de los enlaces CH_2, mientras que los picos que se observa en 1615, 1410 y 1050 cm^{-1} se asocian con los enlaces -C=C, C-C, C-N, respectivamente, los cuales están relacionados a los alquenos y aminas aromáticas presentes en las moléculas del extracto de las hojas de *Anemopsis californica* que se presentan en la fig 2. (Vasantharaj *et al.*, 2021). En el espectro de las nanopartículas (NP's) se puede ver que existen algunas bandas similares al extracto, lo que indica que las moléculas de los extractos están presentes en las nanopartículas obtenidas, como se ha reportado en la síntesis de nanopartículas de ZnO usando otros extractos (Vijayakumar *et al.*, 2018). También se observa la aparición de algunas bandas en 820 y en 520 cm^{-1}, las cuales en la literatura se relacionan con la formación del ZnO (Shabaani *et al.*, 2020).

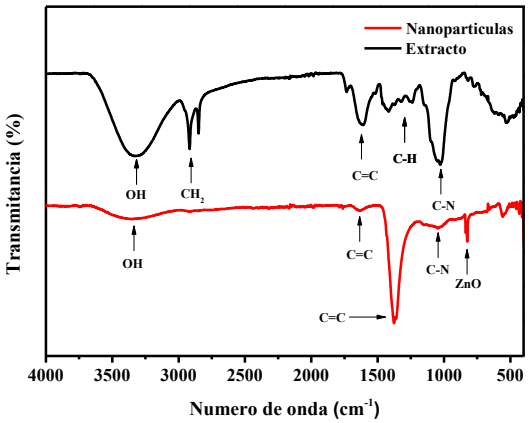


Fig 1. Espectro FTIR del extracto de *Anemopsis californica y* de las nanopartículas sintetizadas.



Fig 2. Hojas de *Anemopsis californica* empleadas durante el proceso de síntesis de nanopartículas de ZnO.

ISSN en trámite

3.2 UV-vis y band gap

En la fig 3a) se muestra el espectro de absorción de las nanopartículas de ZnO en la cual podemos encontrar un pico de absorción a 370 nm, este pico se ha reportado previamente como característico del ZnO en forma de nanopartículas, indicando que se obtuvieron las nanopartículas de manera satisfactoria, como se observó en el análisis de FTIR (Ahmad *et al.*, 2021). Utilizando los resultados obtenidos por UV-Vis se calculó la brecha energética prohibida (band gap) con el modelo de TAUC. El modelo matemático de TAUC se representa por la ecuación:

$$\alpha(v)hv=A\,(hv-E_g)^n$$

donde $\alpha(v)$ es el coeficiente de absorción, hv es la energía del fotón incidente, A es una constante y E_g es la energía de band gap y n=1/2. En la fig 3b) se muestra el valor de band gap calculado, el cual fue de 4.5 eV, este valor es superior al promedio del valor reportado en la literatura, sin embargo, es consistente con otros valores ya reportados (Aljawfi *et al.*, 2020). Este valor de band gap indica que se necesita una mayor energía para lograr la transición de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción (Khan *et al.*, 2019).

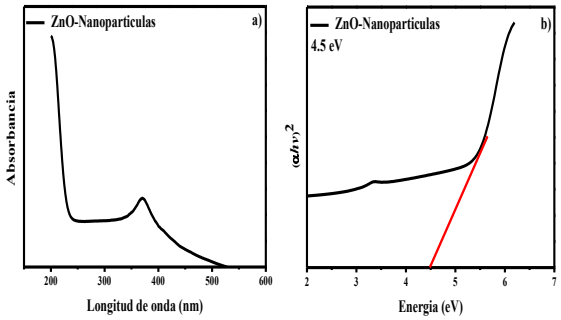


Fig 3. (a) Espectro de absorción UV-vis y (b) gráfica TAUC para el cálculo del band gap de las nanopartículas de ZnO sintetizadas.

3.3 DRX

En la figura 4 se muestra el difractograma de las nanopartículas sintetizadas en los que se pueden encontrar picos en 31.8°, 34.3°, 36.3°, 47.6°, 56.5°, 62.8°, 67.89°; que corresponden a los planos cristalinos (100), (002), (101), (102), (110), (103) y (112), respectivamente, de la carta cristalográfica JCPDS #01-089-1397, correspondientes a una fase hexagonal wurzita (Jayasankari, Pramothkumar and Mani, 2022). El patrón de difracción indica que no hay presencia de otras fases cristalinas en el material sintetizado, los picos agudos e intensos indican una gran cristalinidad en el material y ausencia de materiales amorfos (Karthik *et al.*, 2022).

Para realizar el cálculo del tamaño de cristal se empeló la fórmula de Debye-Scherrer:

$$\tau=K\lambda/\beta\cos(\theta)$$

Donde τ es el tamaño de cristal, K es una constante adimensional con valor de 0.94; λ, es el valor de la longitud de onda de los rayos X; β es la anchura a media altura de la intensidad máxima del pico de difracción y θ es el ángulo de Bragg donde aparece el pico (Chakraborty *et al.*, 2020). Tomando el pico en 2θ= 36.3 se obtuvo el tamaño de cristal con un valor de 44 nm.

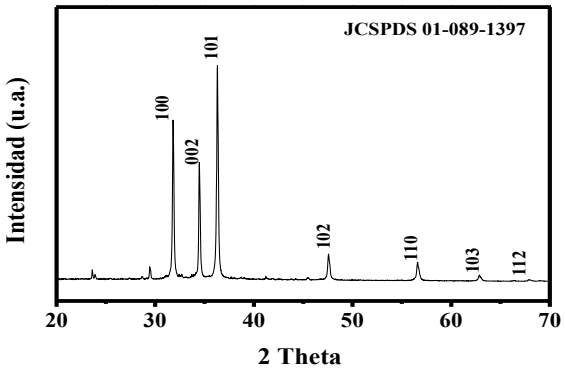


Fig 4. Patrón de difracción de las nanopartículas de ZnO sintetizadas con *Anemopsis californica.*

3.4 Degradación fotocatalítica

En la fig 5 se muestran los resultados del proceso de degradación fotocatalítica del colorante azul de metileno. En los análisis es posible observar que las nanopartículas muestran adsorción durante la agitación en la oscuridad, esto se debe a la afinidad de cargas electrostáticas que se da entre las nanopartículas y el colorante. Una vez iniciado el proceso al encender la lámpara, las nanopartículas muestran una buena velocidad y tendencia de degradación en la fig 5a se muestran los espectros de absorción de UV-vis de las muestras, las cuales se tomaron cada 10 minutos por los primeros 60 min y posteriormente cada 30 min hasta un total de 180 min; en estos espectros se logra ver la disminución de la señal en función del tiempo lo cual indica una disminución en la cantidad del colorante presente en la solución. Al analizar la absorbancia de la gráfica de absorción de UV-vis se determinó la degradación del colorante presentado en la fig 5b logrando una degradación del 48% en la primera hora, al finalizar el análisis a los 180 min, se alcanzó una degradación del 78%, este resultado bueno, comparado con algunos reportes previos (Azarang *et al.*, 2015; Madhumitha *et al.*, 2019; Alharthi *et al.*, 2020). Los resultados obtenidos son resumidos en la tabla 1.

ISSN en trámite

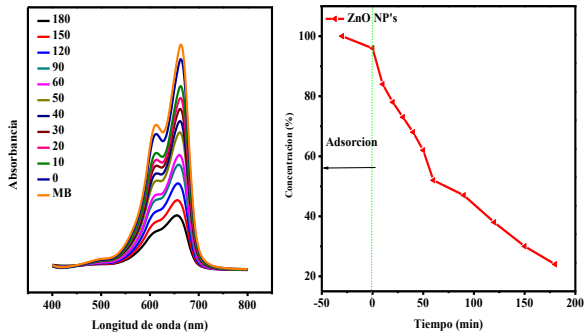


Fig 5. (a) Absorbancia de las muestras tomadas en el proceso de fotocatálisis y (b) degradación de MB empleando nanopartículas de ZnO sintetizadas usando extracto de *Anemopsis Californica.*

Tabla 1. Degradación de azul de metileno empleando nanopartículas de ZnO bajo luz UV durante 180 min.

Tiempo (min)	Degradación (%)
-30	0
0	4
10	16
20	22
30	28
40	32
50	34
60	48
90	53
120	62
150	70
180	78

3.3 Propuesta de mecanismo degradación

Se presenta una propuesta del mecanismo de degradación en la fig 6 donde se describe el proceso en el cual el azul de metileno se elimina durante el proceso de fotocatálisis. Al irradiarse las nanopartículas de ZnO con suficiente energía para superar el band gap, los electrones de la banda de valencia se excitarán y pasan a la banda de conducción generando un hueco (h^+) en la banda de valencia y electrones fotogenerados (e^-) en la banda de conducción. Los electrones fotogenerados reducen el oxígeno para formar radicales superóxidos (O_2°) y en la banda de valencia el hueco que dejó el electrón excitado permite la formación de raciales hidroxilos (OH^-), estas dos especies generadas son altamente reactivas y al entrar en contacto con las moléculas de colorantes degradándolas para formar productos no tóxicos como H_2O, CO_2 y otras especias minerales (Weldegebrieal, 2020; Jarvin *et al.*, 2022)



Fig 6. Propuesta del mecanismo de degradación de azul de metileno empleando nanopartículas de ZnO.

4. CONCLUSIONES

Se logró la síntesis de nanopartículas de ZnO de manera correcta empleando extracto de *Anemopsis californica*. El extracto y las nanopartículas fueron analizadas por espectroscopía de FTIR con la cual se confirmó la presencia de moléculas orgánicas que actuaron como estabilizadoras y reductoras en el proceso de síntesis, la presencia de ZnO también fue confirmada por la misma técnica. Las nanopartículas tuvieron un punto de absorbancia máxima en 370 nm característico del ZnO y un band gap de 4.5 eV. Las nanopartículas presentaron una buena actividad fotocatalítica logrando una degradación de azul de metileno del 78 % en 180 min bajo luz UV.

REFERENCIAS

Ahmad, M. *et al.* (2021) 'Phytogenic fabrication of ZnO and gold decorated ZnO nanoparticles for photocatalytic degradation of Rhodamine B', *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Elsevier Ltd, 9(1), p. 104725. doi: 10.1016/j.jece.2020.104725.

Aldeen, T. S., Ahmed Mohamed, H. E. and Maaza, M. (2022) 'ZnO nanoparticles prepared via a green synthesis approach: Physical properties, photocatalytic and antibacterial activity', *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. Elsevier Ltd, 160(August 2021), p. 110313. doi: 10.1016/j.jpcs.2021.110313.

Alharthi, F. A. *et al.* (2020) 'Green synthesis of zno nanostructures using salvadora persica leaf extract: Applications for photocatalytic degradation of methylene blue dye', *Crystals*, 10(6). doi: 10.3390/cryst10060441.

Aljawfi, R. N. *et al.* (2020) 'Impact of annealing on the structural and optical properties of ZnO nanoparticles and tracing the formation of clusters via DFT calculation', *Arabian Journal of Chemistry*. King Saud University, 13(1), pp. 2207–2218. doi: 10.1016/j.arabjc.2018.04.006.

Azarang, M. *et al.* (2015) 'One-pot sol-gel synthesis of reduced graphene oxide uniformly decorated zinc oxide nanoparticles in starch environment for highly efficient photodegradation of Methylene Blue', *RSC Advances*, 5(28), pp. 21888–21896. doi: 10.1039/c4ra16767h.

ISSN en trámite

Begum, S. and Ahmaruzzaman, M. (2018) 'Green synthesis of SnO2 quantum dots using Parkia speciosa Hassk pods extract for the evaluation of anti-oxidant and photocatalytic properties', *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 184, pp. 44–53. doi: https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.04.041.

Chakraborty, S. *et al.* (2020) 'Averrhoe carrambola fruit extract assisted green synthesis of zno nanoparticles for the photodegradation of congo red dye', *Surfaces and Interfaces*. Elsevier, 19(February), p. 100488. doi: 10.1016/j.surfin.2020.100488.

Ezealisiji, K. M. *et al.* (2019) 'Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Solanum torvum (L) leaf extract and evaluation of the toxicological profile of the ZnO nanoparticles–hydrogel composite in Wistar albino rats', *International Nano Letters*. Springer Berlin Heidelberg, 9(2), pp. 99–107. doi: 10.1007/s40089-018-0263-1.

Faisal, S. *et al.* (2021) 'Green Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Aqueous Fruit Extracts of Myristica fragrans: Their Characterizations and Biological and Environmental Applications', *ACS Omega*, 6(14), pp. 9709–9722. doi: 10.1021/acsomega.1c00310.

Jarvin, M. *et al.* (2022) 'Remarkable sunlight-driven photocatalytic performance of Ag-doped ZnO nanoparticles prepared by green synthesis for degradation of emerging pollutants in water', *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Berlin Heidelberg, (0123456789). doi: 10.1007/s11356-022-19796-6.

Jayasankari, S., Pramothkumar, A. and Mani, P. (2022) 'Facile synthesis and characterization of ZnO NPs, ZnO/CdO and ZnO/SnO2 nanocomposites for photocatalytic degradation of Eosin Yellow and Direct Blue 15 under UV light irradiation', *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Springer US, 33(13), pp. 9858–9874. doi: 10.1007/s10854-022-07968-6.

Kalpana, V. N. and Devi Rajeswari, V. (2018) 'A Review on Green Synthesis, Biomedical Applications, and Toxicity Studies of ZnO NPs', *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2018. doi: 10.1155/2018/3569758.

Karthik, K. V. *et al.* (2022) 'Green synthesis of Cu-doped ZnO nanoparticles and its application for the photocatalytic degradation of hazardous organic pollutants', *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 287(P2), p. 132081. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132081.

Khan, M. M. *et al.* (2019) 'Potentials of Costus woodsonii leaf extract in producing narrow band gap ZnO nanoparticles', *Materials Science in Semiconductor Processing*. Elsevier Ltd, 91(November 2018), pp. 194–200. doi: 10.1016/j.mssp.2018.11.030.

Madhumitha, G. *et al.* (2019) 'Green synthesis, characterization and antifungal and photocatalytic activity of Pithecellobium dulce peel–mediated ZnO nanoparticles', *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. Elsevier Ltd, 127, pp. 43–51. doi: 10.1016/j.jpcs.2018.12.005.

Medina-Holguín, A. L. *et al.* (2008) 'Chemotypic variation of essential oils in the medicinal plant, Anemopsis californica', *Phytochemistry*, 69(4), pp. 919–927. doi: 10.1016/j.phytochem.2007.11.006.

Medina, A. L. *et al.* (2005) 'Composition and antimicrobial activity of Anemopsis californica leaf oil', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(22), pp. 8694–8698. doi: 10.1021/jf0511244.

Osuntokun, J., Onwudiwe, D. C. and Ebenso, E. E. (2019) 'Green synthesis of ZnO nanoparticles using aqueous Brassica oleracea L. var. italica and the photocatalytic activity', *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12(4), pp. 444–457. doi: 10.1080/17518253.2019.1687761.

Sadiq, H. *et al.* (2021) 'Green synthesis of ZnO nanoparticles from Syzygium Cumini leaves extract with robust photocatalysis applications', *Journal of Molecular Liquids*, 335. doi: 10.1016/j.molliq.2021.116567.

Shabaani, M. *et al.* (2020) 'Green synthesis of ZnO nanoparticles using loquat seed extract; Biological functions and photocatalytic degradation properties', *Lwt*. Elsevier Ltd, 134(April), p. 110133. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110133.

Sharmila, G., Thirumarimurugan, M. and Muthukumaran, C. (2019) 'Green synthesis of ZnO nanoparticles using Tecoma castanifolia leaf extract: Characterization and evaluation of its antioxidant, bactericidal and anticancer activities', *Microchemical Journal*. Elsevier, 145(November 2018), pp. 578–587. doi: 10.1016/j.microc.2018.11.022.

Silva-Osuna, E. R. *et al.* (2022) 'Study of the optical properties of TiO2 semiconductor nanoparticles synthesized using Salvia rosmarinus and its effect on photocatalytic activity', *Optical Materials*. Elsevier B.V., 124(January), p. 112039. doi: 10.1016/j.optmat.2022.112039.

Soares, V. A. *et al.* (2020) 'Green synthesis of ZnO nanoparticles using whey as an effective chelating agent', *Materials Letters*. Elsevier B.V., 259, p. 126853. doi: 10.1016/j.matlet.2019.126853.

Soto-Robles, C. A. *et al.* (2019) 'Study on the effect of the concentration of Hibiscus sabdariffa extract on the green synthesis of ZnO nanoparticles', *Results in Physics*. Elsevier, 15(November), p. 102807. doi: 10.1016/j.rinp.2019.102807.

Vasantharaj, S. *et al.* (2021) 'Enhanced photocatalytic degradation of water pollutants using bio-green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs)', *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Elsevier Ltd, 9(4), p. 105772. doi: 10.1016/j.jece.2021.105772.

Vijayakumar, S. *et al.* (2018) 'Biosynthesis, characterization and antimicrobial activities of zinc oxide nanoparticles from leaf extract of Glycosmis pentaphylla (Retz.) DC', *Microbial Pathogenesis*. Elsevier Ltd, 116(December 2017), pp. 44–48. doi: 10.1016/j.micpath.2018.01.003.

Weldegebrieal, G. K. (2020) 'Synthesis method, antibacterial and photocatalytic activity of ZnO nanoparticles for azo dyes in wastewater treatment: A review', *Inorganic Chemistry Communications*. Elsevier, 120(June), p. 108140. doi: 10.1016/j.inoche.2020.108140.

ISSN en trámite

Extracción e identificación de compuestos activos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y Tepozán (*Buddleja cordata*) de la zona de Milpa Alta

Melibea Arenas Castañeda[1]. Rocío Alejandra Mata Villanueva[2]. Leticia Cruz Hernández [3]. Alondra Yuriko Cirilo Urrutia [4].

[1]Instituto Tecnológico de Milpa Alta-TecNM, Milpa Alta, C.P. 12300, Ciudad de México, México (Tel: (52)5537810820; e-mail: melibea.ac@ milpaalta.tecnm.mx).
[2]Instituto Tecnológico de Milpa Alta-TecNM, Milpa Alta, C.P. 12300, Ciudad de México, México (Tel: (52)5544954115; e-mail: rocio.mv@milpaalta.tecnm.mx
[3]Instituto Tecnológico de Milpa Alta-TecNM, Milpa Alta, C.P. 12300, Ciudad de México, México (Tel: (52)5610512954 e-mail: l171070213@ milpaalta.tecnm.mx
[4]Instituto Tecnológico de Milpa Alta-TecNM, Milpa Alta, C.P. 12300, Ciudad de México, México (Tel: (52)5615734881 e-mail: l171070169@ milpaalta.tecnm.mx

Resumen: La medicina tradicional hoy es reconocida como un recurso fundamental para la salud de millones de seres humanos. Desde la antigüedad, se ha utilizado plantas con efecto terapéutico para mantener la salud, prevenir y tratar enfermedades, en particular enfermedades crónicas. En Milpa Alta, una demarcación rural de la Ciudad de México, el uso de plantas medicinales ha tenido un impacto importante entre la población, sobre todo para el tratamiento de algunos padecimientos gastrointestinales. De las plantas más utilizadas se encuentran el Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y el Tepozán (*Buddleja cordata*) que presentan efectos desparasitantes, antiinflamatorios, antiespasmódico, antidiarreico entre otros. Estos efectos se atribuyen, principalmente, a los metabolitos secundarios: terpenoides y flavonoides. El objetivo de este trabajo es la extracción de compuestos activos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y Tepozán (*Buddleja cordata*) con disolventes de diferente polaridad, su identificación por medio de UV-vis y determinación del método de mayor eficiencia de extracción (maceración y Soxhlet).

Palabras clave: Estafiate, Tepozán, extracción, compuestos activos, UV, terpenoides, flavonoides, maceración, Soxhlet.

1. INTRODUCCIÓN

La medicina tradicional hoy es reconocida como un recurso fundamental para la salud de millones de seres humanos, es una parte importante de la cosmovisión de los pueblos indígenas y representa el conocimiento milenario sobre la madre tierra y el uso de plantas medicinales que los indígenas han resguardado y que tiene un valor incalculable fortaleciendo y preservando su identidad (Jiménez, 2017). Desde la antigüedad, la medicina tradicional se ha utilizado para mantener la salud, prevenir y tratar enfermedades, en particular enfermedades crónicas (Taddei-Bringas *et al*., 1999). Uno de los usos más promisorios y difundidos por las culturas tradicionales y las terapéuticas alternativas es el de las plantas medicinales, que son cualquier especie vegetal (planta, arbusto o árboles) que contiene sustancias que pueden ser empleadas para propósitos terapéuticos y cuyos principios activos son la base para el desarrollo de la medicina moderna, es decir, para la síntesis de nuevos fármaco; y en algunas zonas rurales e indígenas, son el único recurso del que disponen por falta de instituciones médicas y recursos económicos. Se estima que alrededor del 80% de la población mundial recurre a la medicina tradicional, la que en gran parte puede aún ser valorada para la atención primaria de la salud (Escamilla y Moreno, 2015; Loraine y Mendoza-Espinoza, 2010; Rangel-Ospino, *et al*., 2018; Villarreal-Ibarra *et al*., 2014).

México es un país con una basta biodiversidad. Posee un gran número de plantas medicinales que satisfacen las necesidades culturales. Se ha identificado alrededor de 4,000 especies de plantas con algún uso medicinal y sólo el 5% de éstas han tenido una validación química, farmacológica y biomédica, por lo que marca un campo importante de estudio (Loraine y Mendoza-Espinoza, 2010).

La alcaldía Milpa Alta, una demarcación rural de la Ciudad de México, posee un gran número de plantas medicinales utilizadas para el tratamiento de diversos padecimiento, entre las que se encuentran el Tepozán (*Buddleja cordata*) y el Estafiate (*Artemisia ludoviciana*), esta última en peligro de extinción.


Fuente: Elaboración propia

Estafiate (*Artemisia ludoviciana*). Es una hierba popular mexicana, utilizada para

ISSN en trámite

tratar infecciones gastrointestinales, problemas respiratorios antiespasmódicos, desparasitante en humanos, incluso para el tratamiento de Diabetes *mellitus* tipo 2 (Anaya-Eugenio *et al*., 2014; Ezeta, 2016). El nombre estafiate deriva del término náhuatl "*iztauhyátl*" que significa "amargo" y se refiere al sabor amargo de los extractos de sus hojas (Wright, 2002).

Se ha detectado la presencia de más de 70 compuestos en el Estafiate. Los principales grupos hallados son monoterpenos (alcanfor, borneol, limoneno, entre otros), flavonoides, cetonas de artemisia, compuestos azufrados y alquinos (De Paz, 2020; Palacios *et al*., 2021; Anaya-Eugenio *et al*., 2014).

Cuadro 1. Compuestos Identificados en *Artemisia ludoviciana.*

Compuestos Identificados	Efecto
Lactonas sesquiterpénicas	Antitumoral por alquilación selectiva de las moléculas reguladoras del crecimiento.
	Antiinflamatoria, antibacterial, citotóxica y antimalárica.
Terpenos	Antioxidante, antimicrobiana y antiinflamatoria.
Flavonoides	Anticancerígena, antioxidante y prevención de enfermedades cardiovasculares
Terpenoides	Actividad antiviral

(Adaptado de Elizalde, 1999; Dupuy et al., 2008; Ezeta,2016; Ávalos y Pérez-Urria, 2009)

Tepozán (*Buddleja cordata)*. Es un árbol o arbusto cuyas hojas son utilizadas para tratar la diarrea, dolor de cabeza, reumatismo, dolor de cintura, calambres musculares, enfermedades de la piel e inflamaciones, hemorragias nasales e infecciones intestinales (Estrada, 2010).



Fuente: Elaboración propia

Entre los componentes aislados de Tepozán (*Buddleia cordata)* se hallan metabolitos secundarios del tipo fenilpropanoide como los ácidos hidroxicinámicos: p-cumárico, caféico, ferúlico y sináptico, un fenilpropanoide conjugado, conocido como verbascósido, o acteósido y el flavonoide linarina, así como la presencia adicional de los ácidos de las subclases de hidroxibenzoicos, e hidroxicinámicos y flavonoides subclase flavonoles, flavonas y flavononas. Estos metabolitos forman parte de la defensa química de la planta contra los patógenos o su interacción con el medio ambiente (Carmona, 2014; Estrada, 2010; Villegas-Nova *et al*., 2020).

Cuadro 2. Compuestos identificados en *Buddleja cordata.*

Compuestos identificados	Efecto
Verbascósidos, linarina, luteolina-7-O- β -D-glucósido y luteolina	Antiinflamatorio Actividad hipoglicemiante
Ácido gálico y equivalentes	Antioxidante, antihemolítico
Verbascósidos	Antiinflamatorio en artritis, antioxidante, antiedematoso
Flavonoles, flavanonas y flavonas	Antioxidante
Ácidos hidroxibenzoicos, ácidos hidroxicinámicos, flavonoles, flavanonas y flavonas	Antiinflamatoria y gastroprotectora

(Adaptado de Estrada, 2010; Carmona, 2014Villegas et al., 2020)

Principios activos y uso terapéutico. El uso principal de Tepozán y Estafiate se deben a la cantidad de fenoles, flavonoides y terpenoides que en ellas se encuentran, ya que les proporcionan una gran actividad parasiticida, antimicrobiana, analgésica, antiviral, antioxidante, antiinflamatoria, gastro protectora, entre otras. (Estrada, 2010; Pérez-Alonso y Jiménez, 2011). Estos compuestos, conocidos como metabolitos secundarios (MS), son sintetizados por la planta como mecanismo de defensa en contra de microrganismos invasores, depredadores y patógenos. Los MS se clasifican, de acuerdo con su composición química, en dos grupos principales: nitrogenados y no nitrogenados. Los MS que contienen nitrógeno incluyen a los alcaloides, aminoácidos no proteicos, aminas, glucósidos cianogénicos y glucosinolatos. Los MS no nitrogenados se dividen en terpenoides, poliacetilenos, policétidos y fenilpropanoides (Sepúlveda *et al*., 2003). De acuerdo con Pérez-Alonso y Jiménez (2011) los compuestos secundarios de plantas de interés comercial han sido incluidos en tres principales categorías según sus rutas biosintéticas: terpenos, compuestos fenólicos y compuestos nitrogenados.

Los flavonoides contienen en su estructura química un número variable de grupos hidroxilo fenólicos y excelentes propiedades de quelación del hierro y otros metales de transición, lo que les confiere una gran capacidad antioxidante. Pertenecen al grupo de los compuestos fenólicos

Los terpenoides o isoprenoides se derivan del isopreno y se clasifican de acuerdo con el número de unidades de isopreno que los forman. Los terpenos se forman por la polimerización de unidades de isoprenosy esteroides y se dividen en seis grupos: monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos, triterpenos, tetraterpenos y esteroles, dentro de los cuales se encuentran carotenos, glicósidos cardiotónicos, taxol, entre otros (Pérez-Alonso y Jiménez, 2011).

ISSN en trámite

El conocimiento que se tiene en Milpa Alta sobre el uso terapéutico de estas plantas de uso medicinal es meramente empírico y a pesar, según Loraine y Mendoza-Espinoza (2010), de la baja toxicidad de los principios activos de algunas especies vegetales, éstas pueden dar origen a problemas de salud debido a factores como contaminación microbiológica, presencia de restos de plaguicidas, herbicidas o metales pesados, y por efectos adversos debidos a la interacción con el fármaco de síntesis si el paciente se encuentra en tratamiento. Asimismo, debe considerarse que, quizás, la planta utilizada puede no ser la auténtica, ya sea por confusión en la recolección de la especie indicada o con propósitos de adulteración o que la época de recolección y los procesos de secado y conservación no sean los adecuados, interfiriendo, directamente, en la concentración de los compuestos activos de la planta y, por ende, la calidad del producto. El objetivo de este trabajo es la extracción de los compuestos activos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana)* y Tepozán (*Buddleja cordata*)) con disolventes de diferente polaridad y Soxhlet, así como su identificación por medio de UV-vis y determinación del método con mayor eficiencia de extracción.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general:

Extraer e identificar los principios activos de las hojas de Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y Tepozán (*Buddleja cordata)* mediante extracción sólido-líquido.

2.2 Objetivos específicos:

Extraer los principios activos de las hojas de Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y Tepozán (*Buddleja cordata)* mediante maceración con disolventes de diferente polaridad y Soxhlet, concentrando los extractos por destilación simple.

Identificar los compuestos activos en los extractos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y Tepozán (*Buddleja cordata)* mediante espectrofotometría UV-Vis.

Determinar el método con mayor eficiencia de extracción de principios activos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y Tepozán (*Buddleja cordata)*.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Bioquímica del Instituto Tecnológico de Milpa Alta, Independencia Sur No. 36, San Salvador Cuauhtenco, Milpa Alta, C.P. 12300, CDMX (figura 1).

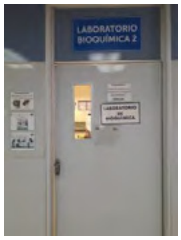


Figura 1. Laboratorio de Bioquímica, ITMA.

Muestras vegetales. Se recolectó las hojas (muestras vegetales) de Estafiate (*Artemisia ludoviciana)* y Tepozán (*Buddleja cordata)* en los poblados de San Salvador Cuauhtenco y San Pablo Ozotepec, alcaldía Milpa Alta, CDMX, durante los meses de septiembre y octubre.

Acondicionamiento de las muestras. Las muestras vegetales se secaron a la sombra a temperatura ambiente durante dos semanas, posteriormente en horno de convección a temperatura 50-52°C durante 12 horas. Finalmente, se realizó una molienda hasta disminuir el tamaño de partícula a 0.180 mm (figura 2a, 2b, 2c, 2d y 2e).



Figura 2a. Secado en estufa de Estafiate (*Artemisia ludoviciana)*



Figura 2b. Molienda de hojas de Estafiate (*Artemisia ludoviciana)*



Figura 2c. Tamizado de Estafiate (*Artemisia ludoviciana)*para Soxhlet



Figura 2d. Secado en estufa de Tepozán (*Buddleja cordata*)



Figura 2e. Molienda de hojas de Tepozán (*Buddleja cordata*)

Extracción. La extracción de compuestos activos de Estafiate se realizó por maceración con hexano, metanol y acetato de etilo, respectivamente. Para el caso de Tepozán, se realizó maceración con hexano, metanol, diclorometano y extracción sólido-líquido (Soxhlet).

Maceración en frío**:** se colocó 50 g de muestra vegetal en 400 mL de hexano, metanol y acetato de etilo, para el caso de Estafiate y hexano, metanol y diclorometano para Tepozán, durante 4 semanas.

Extracción sólido-líquido (Soxhlet)**:** se colocó 6 g muestra vegetal + 300 mL de hexano. Realizando 7 lavados.

Los extractos obtenidos se concentraron por medio de destilación simple.

Espectrofotometría. Para la identificación de los compuestos activos se midió la absorbancia de los extractos de Estafiate *(Artemisia ludoviciana)* y Tepozán *(Buddleia cordata)* en un espectrofotómetro Agilent UV-Vis Cary 60 a 280 nm para flavonoides y 210 nm para terpenos-terpenoides (Carmona, 2014; Estrada, 2010; Martínez, 2014).

ISSN en trámite

4. RESULTADOS

La extracción sólido-líquido se realizó con un equipo Soxhlet y hexano como disolvente. Se efectuaron 7 lavados, obteniendo un extracto amarillo (figura 3a y 3b). Posteriormente, se concentró por medio de destilación simple (figura 4).

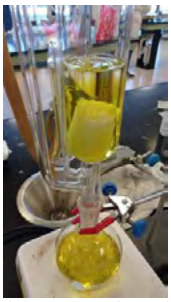


Figura 3a. Extracción Soxhlet de Estafiate (*Artemisia ludoviciana).*



Figura 3b. Extracción Soxhlet de Tepozán (*Buddleja cordata).*



Figura 4. Destilación simple

Para determinar la presencia de terpenoides y flavonoides en los extractos de las muestras vegetales de Estafiate y Tepozán se midió la absorbancia a 210 y 280 nm, respectivamente (tabla 1 y 2). Las longitudes de onda se determinaron debido a que los compuestos extraídos presentan en su estructura química dobles enlaces, triples enlaces, sistemas aromáticos, grupos carbonilos y otros heteroátomos, cuya máxima absorbancia es en la región UV. Por lo tanto, la absorbancia (Abs) es directamente proporcional a la concentración de estos compuestos activos en las muestras en de ambas plantas, considerando que a mayor número de moléculas mayor es la interacción de la luz con ellas, dando como resultado una lectura mayor.

Tabla 1 . Espectrofotometría UV-vis Estafiate (*Artemisia ludoviciana)*

Método	Disolvente	Terpenoides 210 nm	Flavonoides 280 nm
		Abs	Abs
Soxhlet	Hexano	0.6859	0.7603
Macerado	Hexano	0.6489	0.1709
Macerado	Metanol	2.9382	1.3534
Macerado	Acetato de etilo	2.132	0.2923

Tabla 2. Espectrofotometría UV-vis Tepozán (*Buddleja cordata)*

Método	Disolvente	Terpenoides 210 nm	Flavonoides 280 nm
		Abs	Abs
Soxhlet	Hexano	0.3321	0.1313
Macerado	Hexano	0.5399	0.2231
Macerado	Metanol	0.3368	0.1499
Macerado	Diclorometano	0.4228	0.2377

5. CONCLUSIONES

El empleo de disolventes con diferente polaridad amplia la posibilidad de identificar mayor cantidad de metabolitos secundarios con actividad biológica importante. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el método con mejor porcentaje de extracción fue el macerado para ambas muestras vegetales (Estafiate y Tepozán), esto como resultado del tiempo de exposición de la muestra vegetal con los disolventes, la agitación y al diámetro de partícula, ya que al aumentar la superficie de contacto, permite una mayor interacción de la muestra con el disolvente.

Los principales compuestos activos identificados en las dos muestras vegetales (Estafiate (*Artemisia ludoviciana*) y Tepozán (*Buddleja cordata*)) por espectrofotometría UV-Vis, son terpenoides y flavonoides. Los terpenoides, fueron considerados por su actividad antimicrobiana y los flavonoides por su capacidad antioxidante, dos actividades importantes que pueden ser aprovechados para la salud del ser humano.

En cuanto al disolvente con mejores resultados para la extracción de compuestos activos fue el metanol para Estafiate (*Artemisia ludoviciana)* y para Tepozán (*Buddleja cordata)*, hexano y diclorometano.

REFERENCIAS

1. Anaya-Eugenio, G., Rivero-Cruz, I. Rivera-Chávez, J. y Mata, R. (2014). Propiedades hipoglucemiantes de algunos preparados y compuestos de *Artemisia Ludoviciana Nutt*. *Revista Etnofarmacología*, 155(1): 416-425. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378874114004206
2. Ávalos, A. y Pérez-Urria, E. (2009). Metabolitos secundarios de plantas. *REDUCA*, 2(3):119-145. https://eprints.ucm.es/id/eprint/9603/
3. Carmona, D. (2014). Obtención de flavonoides de interés medicinal y económico a partir de cáscaras de naranja, toronja y de las hojas de tepozán. Tesis de Licenciatura, UNAM. http://132.248.9.195/ptd2014/noviembre/0723496/0723496.pdf

ISSN en trámite

4. De Paz, N. (2020). Evaluación de un extracto hidroalcohólico de Estafiate (*Artemisia ludoviciana nutt.)* sobre inhibición de eclosión de huevos del nematodo parásito *Haemonchus contortus*. Tesis de Licenciatura, UNAM. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/110136/TESIS_NATANAEL_REPOSITORIO_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
5. Dupuy, O. A., Murillo, R. y Bonilla, J. A. (2008). Lactonas sesquiterpénicas de las plantas Viguiera sylvatica y Decachaeta thieleana (Arteraceae) modulan la producción de óxido nítrico y la fagocitosis de macrófagos RAW. Revista de Biología Tropical. 56(3): 1063-1073. https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v56n3/art08v56n3.pdf
6. Elizalde, M. N. (1999). Estudio químico y evaluación biológica de *Artemisia ludoviciana ssp. mexicana* (Estafiate). Tesis de Licenciatura, UNAM. http://132.248.9.195/pd1999/274860/274860.pdf
7. Estrada, M. E. (2010). Producción de fenilpropanoides en cultivos celulares y rizogénicos de *Buddleja corbata*, planta empleada la Medicina Tradicional Mexicana. Disertación Doctoral. UAM-I. http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspuam/presentatesis.php?recno=15565&docs=UAMI15565.pdf
8. Ezeta, A. (2016). Determinación de metabolitos secundarios de Estafiate (*Artemisia Ludoviciana Nutt. spp. mexicana*) con actividad fasciolicida y su evolución biológica *in vitro*. Tesis de Maestría, UNAM. http://132.248.9.195/ptd2016/junio/0746154/0746154.pdf
9. Jiménez, A. A. (2017). Medicina tradicional. Boletín CONAMED-OPS. http://www.conamed.gob.mx/gobmx/boletin/pdf/boletin13/medicina_tradicional.pdf
10. Martínez, C. A. (2014). Determinación de flavonoides con actividad antioxidante presentes en *Alchornea coelophylla*. Tesis de licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira. https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/b110543d-21ba-42d9-940e-70bb405c6ecf/content
11. Pérez-Alonso, N. y Jiménez, E. (2011). Producción de metabolitos secundarios de plantas mediante el cultivo *in vitro*. Biotecnología Vegetal. 11(4): 195-211. https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/255/228
12. Rangel-Ospino, Y., Díaz-Santos, S. y Guerrero-Gutiérrez, R. (2018). Las plantas medicinales como estrategia pedagógica para la conservación del medio ambiente. Cultura, Educación y sociedad. 9(2): 129-136. http://dx.doi.org/10.17981/culteducsoc.9.2.2018.12
13. Sepúlveda, G., Porta, H. y Rocha, M. (2003). La participación de los metabolitos secundarios en la defensa de las plantas. Revista Mexicana de Fitopatología. 21(3): 355-363. https://www.redalyc.org/pdf/612/61221317.pdf
14. Taddei-Bringas, G. A., Santillana-Macedo, M. A., Romero-Cancio, J. A. y Romero-Téllez, M. B. (1999). Aceptación y uso de la herbolaria en medicina familiar. *Salud Pública de México*. 41(3): 216-220. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10641309
15. Villegas-Nova, C., Moreno-Jiménez, M. R. y Rocha-Guzmán, N. (2020). Infusión de la planta medicinal Buddleja scordioides Kunth utilizada para tratar la inflamación intestinal. *Ciencia UAT*, 14(2): 21-33. http://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v14n2/2007-7858-cuat-14-02-21.pdf
16. Villarreal-Ibarra, E.C., García-López, E. , López, P.A., Palma-López, D. J., Lagunes-Espinoza, L.C., Ortiz-García, C.F. y Oranday-Cárdenas, A. (2014). Plantas útiles en la medina tradicional de Malpasito-Huimanguillo, Tabasco, México. *Polibotánica*. (37):109-134. http://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n37/n37a7.pdf
17. Wright, C. W. (2002). Artemisia . 1ª Ed. The School of Pharmacy . University of Bradford. UK. https://books.google.com.mx/books?id=pZoz0VXr15wC&printsec=frontcover&dq=artemisia+medicinal+and+aromatic+plants&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

ISSN en trámite

Estudio de la fotodegradación de naranja de metilo variando la concentración de nanopartículas semiconductoras de ZnO

Mizael Luque Morales*, Reina Vianey Quevedo Robles*, Fabian Murrieta Rico, Priscy Alfredo Luque Morales***

** Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño-Universidad Autónoma de Baja California, C.P. 22860, Ensenada, B.C., México. ** Departamento de Ingeniería Mecatrónica-Universidad Politécnica de Baja California, C.P. 21376, Mexicali, B.C. (e-mail: mizael.luque@uabc.edu.mx; reina.quevedo@uabc.edu.mx; fnmurrietar@upbc.edu.mx; pluque@uabc.edu.mx)*

Resumen: En este trabajo se presenta la síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) utilizando extracto de *Taraxacum officinale,* como agente reductor y estabilizante, a una concentración del 4% (p/v). La síntesis de ZnO fue caracterizada por Difracción de Rayos-X obteniendo una fase cristalina predominante Wurtzita con un tamaño de cristalita de 36 nm, Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR), donde se muestra la banda de absorción para la vibración Zn-O a 400 $cm^{-1,}$ y mediante Espectroscopia de Ultravioleta Visible (UV-Vis) obteniendo una absorción máxima a 378 nm, confirmando la formación de ZnO. La actividad fotocatalítica del ZnO se evaluó en la degradación del colorante naranja de metilo variando la concentración del fotocatalizador (50 mg, 100 mg, y 150 mg), bajo radiación ultravioleta (UV), obteniendo una degradación del 25 %, 61%, y 91% para 50 mg, 100 mg, y 150 mg, respectivamente.

Palabras clave: ZnO, Síntesis verde, *Taraxacum officinale*, Fotocatálisis, Naranja de metilo.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación del agua representa un riesgo inminente para la salud humana, la flora y fauna, así como también, el equilibro del ecosistema. Existe una amplia gama de contaminantes del agua como pesticidas, fenoles, detergentes, productos farmacéuticos y colorantes orgánicos (Cui et al., 2022). De todos los contaminantes antes mencionados, los colorantes orgánicos derivados diversas industrias como la industria textil, la industria de los plásticos, la industria alimentaria, la industria del papel, representan una clase importante de contaminantes en los efluentes (Khatri et al., 2022).

La presencia de colorantes en el agua en cantidades mínimas no es deseable ya que la mayoría de ellos pueden ser tóxicos, mutagénicos y cancerígenos (Rojviroon and Rojviroon, 2022). Por otro lado, en los cuerpos de agua, impiden procesos vitales como la fotosíntesis y prevén la capacidad de re-oxigenación (Negi et al., 2022). Es por ello, que en la actualidad se buscan métodos sencillos y eficientes para lograr su mitigación en el ambiente. Dentro los métodos desarrollados se encuentra la fotocatálisis mediada por óxidos metálicos, como ZnO, estos materiales al interaccionar con la radiación (UV o solar) producen radicales que activan el proceso de degradación de los colorantes (Danish et al., 2021). Sin embargo, es necesario que los fotocatalizadores tengan un área superficial alta para incrementar la adsorción de los colorantes y la disponibilidad de los grupos activos.

Entre los métodos de síntesis para la obtención de nanomateriales, se encuentra la síntesis verde, para lo cual se utilizan materiales amigables con el ambiente, como extractos de plantas, bacterias, biopolímeros, etc., que funcionan como agentes reductores y estabilizantes (Soto-Robles et al., 2021).

En este trabajo, se llevó a cabo la síntesis verde de ZnO utilizando extracto de diente de león (*Taraxacum officinale*), como agente reductor y estabilizante, y se estudió el efecto de la concentración del fotocatalizador en la degradación de naranja de metilo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para la síntesis verde de las nanopartículas de ZnO, se utilizaron hojas de *Taraxacum officinale* (Diente de león) como agente reductor y estabilizante (adquirido en un mercado local). Nitrato de zinc, $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$, como sal precursora, y naranja de

ISSN en trámite

metilo (adquiridos de Faga Lab). Agua desionizada como solvente amigable con el ambiente.

2.2 Metodología

2.2.1. Preparación del extracto de Taraxacum officinale

Para el proceso de extracción del agente reductor y estabilizante, se preparó un extracto de *Taraxacum officinale* a una concentración de 4% (p/v) en 50 mL de agua desionizada. Previamente, las hojas de *Taraxacum officinale* se trituraron y añadieron en el agua desionizada, y se mantuvieron bajo agitación magnética durante 2 h. Posteriormente, se colocaron en un baño térmico a 60 °C durante 1 h. Finalmente, la solución se filtró al vacío utilizando un filtro Watman #4. El extracto se almacenó para su posterior uso.

2.2.2 Síntesis verde de nanopartículas de ZnO

Para la síntesis de ZnO, 2 g de nitrato de zinc se agregaron a 42 mL del extracto de Taraxacum *officinale.* La solución se agitó magnéticamente durante 1 h a temperatura ambiente. Posteriormente, la muestra se colocó en un baño térmico a 60 °C durante 12 h hasta obtener una consistencia pastosa. Por último, las muestras se calcinaron a 400 °C durante 1 h.

2.2.3. Caracterización

Las propiedades del ZnO sintetizado fueron determinadas por diferentes técnicas. Se utilizó Difracción de Rayos-X para determinar la estructura cristalina del ZnO sintetizado. Mediante Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR) modo ATR se determinó los principales grupos funcionales presentes en el material sintetizado y en el extracto, los espectros se obtuvieron Perkin Elmer Spectrum de 4000 a 400 cm^{-1}. Para el estudio de la banda prohibida (Bandgap) se utilizó espectroscopia por ultravioleta visible (UV-Vis) en rango de longitudes de onda desde los 200 nm hasta los 800 nm utilizando un espectrómetro Perkin Elmer UV/Vis Lamda 365.

2.2.4 Actividad fotocatalítica

La actividad fotocatalítica de ZnO fue evaluada para determinar la degradación naranja metilo (NM) bajo radiación ultravioleta (UV). El proceso de degradación se llevó a cabo dentro de un reactor de acero inoxidable (dimensiones: longitud de 27 cm y 5 cm de ancho) que cuenta con una lámpara de UV. Para iniciar la degradación, se añadieron 50 mg, 100 mg, y 150 mg de ZnO a 50 mL de una solución de NM, a una concentración de 15 ppm. Consecutivamente, las muestras se agitaron durante 30 min en la oscuridad, para que se llevar cabo el proceso de adsorción-desorción. Posteriormente, las suspensiones fueron irradiadas con luz UV durante 3 h. Se tomaron alícuotas cada 10 min durante los primeros 30 min y cada 30 min durante las siguientes 2 h 30 min. El porcentaje de degradación de NM se determinó mediante espectroscopia UV/VIS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Difracción de rayos-X (DRX)

En la Fig. 1 se muestran los patrones de difracción para el ZnO. Los picos de difracción ubicados a 31.92°, 34.45°,36.27°,47.58°, 56.65°, 62.91°, y 67.92° corresponde a los planos cristalinos (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), obteniendo una fase cristalina predominante Wurtzita, indexada en la carta cristalográfica JCPDS No. 36-1451).

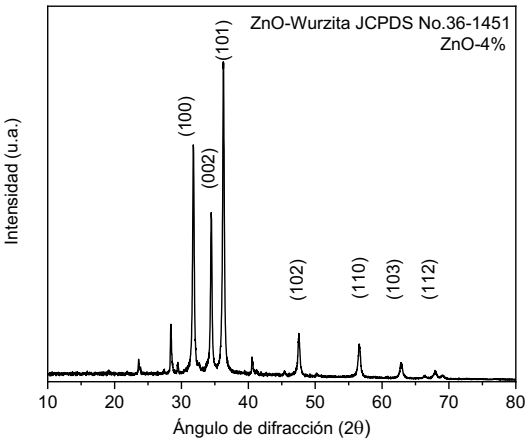


Fig. 1. Difractograma de ZnO sintetizado utilizando extracto de *Taraxacum officinale*.

El tamaño de cristalita del ZnO fue 36 nm, determinado mediante la ecuación de Debye-Scherrer ec. 1 $D = (K\lambda/\beta\cos\theta)$, donde D corresponde al tamaño de la cristalita, λ es la longitud de onda de rayos-X utilizada, θ es el ángulo de difracción, y K es la constante de Scherrer.

3.2 Análisis FTIR

En la Fig. 2 se muestran los espectros de absorción infrarroja para el extracto de *Taraxacum officinale* y el fotocatalizador de ZnO. El espectro del extracto muestra cuatro bandas de absorción principales ubicadas a 3330 cm^{-1}, 2920 cm^{-1}, 2845 cm^{-1}, y 1740 cm^{-1} que corresponden a las vibraciones de los enlaces O-H, C-H, C-H y C=O, respectivamente, según se ha reportado en la literatura para este extracto (Del Moral-G et al., 2021). Por otra parte, la banda de absorción centrada a 400 cm^{-1} en el

ISSN en trámite

espectro del ZnO corresponde a la vibración del enlace Zn-O (Chandramouli et al., 2021), indicando la formación del ZnO.

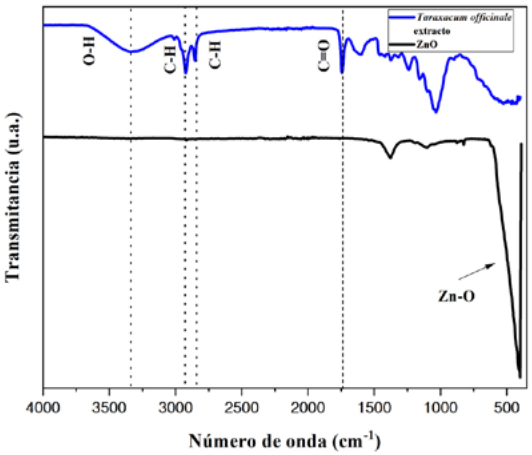


Fig. 2. Espectro FT-IR modo ATR para el extracto de *Taraxacum officinale* (línea azul), y ZnO (línea negra).

3.3 Propiedades ópticas

Mediante el uso del UV-Vis se determinaron las propiedades ópticas del material. En la Fig. 3, se observa el espectro UV-Vis del ZnO en un rango de longitudes de onda desde 200 nm hasta 800 nm, con un pico de absorción máximo ubicado a 378 nm. Para el cálculo de la banda prohibida se utilizó la ec. 2.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{ec. 2}$$

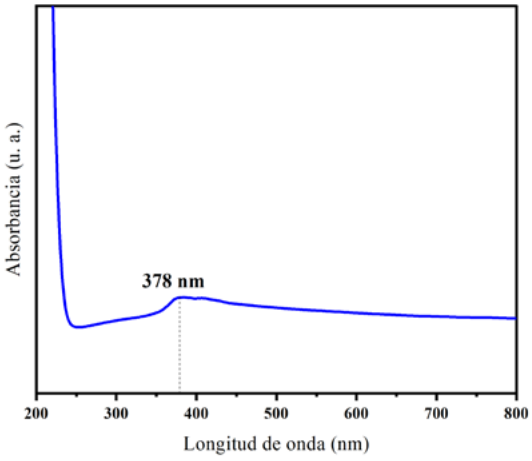


Fig. 3. Espectro de absorción UV-Vis del ZnO.

Donde E es la energía, h es la constante de Plank, c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda del pico de absorción. El cálculo de la banda prohibida dio como resultado 3.28 eV. Este valor es muy similar a lo reportado en la literatura para ZnO en síntesis verde (Dey et al., 2022).

3.4 Actividad fotocatalítica

Para el estudio de la actividad fotocatalítica de las nanopartículas de ZnO, sintetizadas mediante química verde, se varió la concentración del fotocatalizador añadiendo 50 mg, 100 mg y 150 mg, con la finalidad de observar la eficiencia en la degradación de naranja de metilo.

En la Fig. 4, se muestran los estudios de degradación fotocatalítica del naranja de metilo. Durante los primeros 30 min (en la oscuridad) se observa un porcentaje de adsorción de aproxiamadamente 2% en todos los casos. Posteriormente, cuando el proceso es iniciado, es decir, al incidir radiación UV sobre la suspensión, se observa que al incrementar la concentración del fotocatalizador el porcentaje de degradación incrementa 25 %, 61%, y 91% para 50 mg, 100 mg, y 150 mg, respectivamente, es decir, se obtuvo un incremento del 66% en el porcentaje de degradación de MN al incrementar la concentración del ZnO de 50 mg a 150 mg, esto se atribuye a que, al tener una mayor concentración del fotocatalizador hay más sitios activos disponibles, aumentando el número de radicales hidroxilos y superóxidos, lo cual promueve la fotodegradación del colorante (Kumar, 2017). Además, se observó que al incrementar la concentración del ZnO la cinética de degradación (Apéndice A) del NM también incrementó obteniendo un valor de k de 0,0015, 0.0050, 0.0051 min^{-1} para 50 mg, 100 mg y 150 mg, respectivamente.

Por otro lado, en la Fig. 5, se muestran los espectros de absorción UV-Vis con respecto al tiempo para el colorante NM utilizando 150 mg del fotocatalizador de ZnO, se observó una disminución de la absorbancia del colorante al incrementar el tiempo, indicando la degradación del NM al ser sometido al proceso de fotocatálisis.

ISSN en trámite

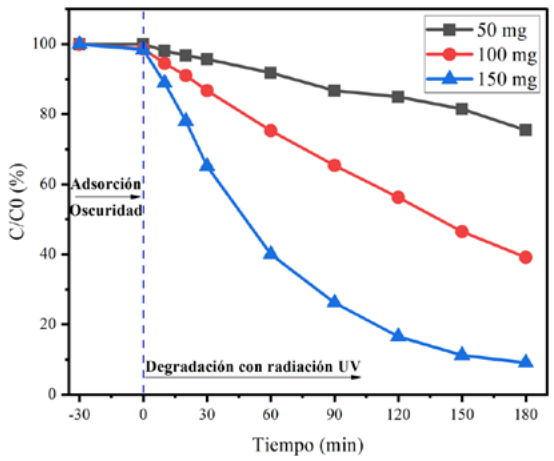


Fig. 4. Actividad fotocatalítica del ZnO bajo radiación UV.

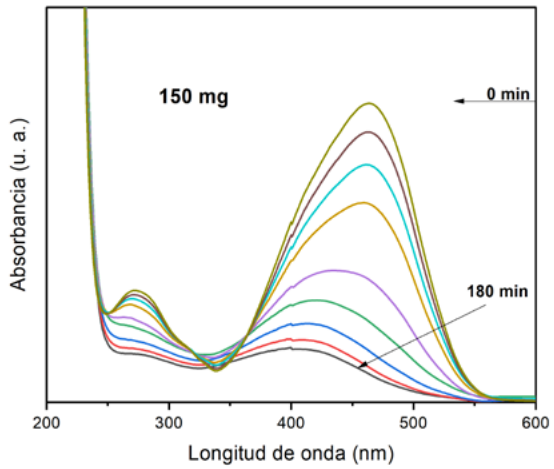


Fig. 5. Espectros de absorción de naranja de metilo utilizando 150 mg de ZnO.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se reporta la síntesis verde de ZnO utilizando extracto de *Taraxacum officinale*, haciendo un proceso sencillo y amigable con el ambiente. Se encontró que al variar la concentración del fotocatalizador en los estudios de degradación fotocatalítica del naranja de metilo había un incremento del 66 % en el porcentaje de degradación cuando se incrementaba la concentración de ZnO de 50 mg a 150 mg. Por lo cual, el uso de *Taraxacum officinale*, como agente reductor y estabilizante, es una opción favorable en la síntesis verde de ZnO para aplicaciones en la fotodegradación de azo colorantes.

REFERENCIAS

Cui, X. et al. (2022) 'Greatly enhanced tribocatalytic degradation of organic pollutants by TiO2 nanoparticles through efficiently harvesting mechanical energy', Separation and Purification Technology, 289, p. 120814. doi:10.1016/j.seppur.2022.120814

Khatri, M. et al. (2022) 'Photocatalytic degradation of dyes using synthesized δ-MnO2 nanostructures', Chemical Data Collections, 39, p. 100854. doi:10.1016/j.cdc.2022.100854.

Rojviroon, O. and Rojviroon, T. (2022) 'Photocatalytic process augmented with micro/nano bubble aeration for enhanced degradation of synthetic dyes in wastewater', Water Resources and Industry, 27, p. 100169. doi:10.1016/j.wri.2021.100169.

Negi, A. et al. (2022) 'Antibacterial, antioxidant and photodegradation potential of ZnO nanoparticles mediated via roots of Taraxacum officinale radix', International Conference on "Green Chemistry and Engineering towards Sustainable Development-An Industrial Perspective", 57, pp. 2435–2443. doi:10.1016/j.matpr.2022.02.019.

Danish, M.S. et al. (2021) 'Photocatalytic Applications of Metal Oxides for Sustainable Environmental Remediation', Metals, 11(1). doi:10.3390/met11010080.

Soto-Robles, C.A. et al. (2021) 'Biosynthesis, characterization and photocatalytic activity of ZnO nanoparticles using extracts of Justicia spicigera for the degradation of methylene blue', Journal of Molecular Structure, 1225, p. 129101. doi:10.1016/j.molstruc.2020.129101.

Del Moral-G, A. et al. (2021) 'Time-dependent eco-friendly method to produce Au nanometric assemblies with fluorescent properties', Journal of Crystal Growth, 564, p. 126130. doi:10.1016/j.jcrysgro.2021.126130.

Chandramouli, K. et al. (2021) 'Synthesis, structural and antibacterial activity of pure, Fe doped, and glucose capped ZnO nanoparticles', Surfaces and Interfaces, 26, p. 101327. doi:10.1016/j.surfin.2021.101327.

Dey, A. et al. (2022) 'Optically engineered ZnO Nanoparticles: Excitable at visible wavelength and lowered cytotoxicity towards bioimaging applications', Applied Surface Science, 592, p. 153303. doi:10.1016/j.apsusc.2022.153303.

Kumar, A. (2017) 'A Review on the Factors Affecting the Photocatalytic Degradation of Hazardous Materials', Material Science & Engineering International Journal, 1(3). doi:10.15406/mseij.2017.01.00018.

de Moraes, N.P. *et al.* (2018) 'Methylene blue photodegradation employing hexagonal prism-shaped niobium oxide as heterogeneous catalyst: Effect of catalyst dosage, dye concentration, and radiation source', *Materials Chemistry and Physics*, 214, pp. 95–106. doi:10.1016/j.matchemphys.2018.04.063.

Prakash, K. *et al.* (2016) 'Controllable synthesis of SnO2 photocatalyst with superior photocatalytic activity for the degradation of methylene blue dye solution', *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(14), pp. 1138–1155. doi:10.1080/17458080.2016.1188222.

ISSN en trámite

Sagadevan, S. *et al.* (2022) 'Photocatalytic degradation of methylene blue dye under direct sunlight irradiation using SnO2 nanoparticles', *Inorganic Chemistry Communications*, p. 109547. doi:10.1016/j.inoche.2022.109547.

Apéndice A. Velocidad de degradación

La velocidad de degradación fue calculada utilizando la ec. 3: $\ln(C/C_0) = kt$. Donde C representa la concentración del colorante a diferentes tiempos, C_0 representa la concentración del colorante a t=0, t es el tiempo de irradiación UV, y k es la constante de velocidad.

ISSN en trámite

Efecto Inhibidor del Aloe Vera en Solución Alcalina que Simule los Poros del Concreto Reforzado

Carrillo B. Anna Carolina* Corvo P. Francisco Eduardo García O. Esteban Miguel****

**Universidad Autónoma de Campeche. Calle Avenida Agustín Melgar s/n, Buenavista, 24039. San Francisco de Campeche, Campeche. México (acarrbirk@gmail.com).*

***Centro de Investigación de Corrosión. Universidad Autónoma de Campeche. Av. Héroe de Nacozari 480. C.P. 24079. San Francisco de Campeche, Campeche. México (frecorvo@uacam.mx) **(emgarcia@uacam.mx) ***

Resumen: En el presente trabajo, mediante técnicas electroquímicas, se evalúa la eficiencia inhibidora del mucílago del aloe vera, producto natural que contiene una apreciable proporción de un polisacárido soluble, empleando una solución modelada de los poros del concreto en medio alcalino y con iones de cloruro, situación que simula la presente en ambientes marino-costero para proteger y prevenir la corrosión en estructuras de concreto reforzado en zonas costeras.

Palabras clave: Mucilago, Oxidación, Nucleación, Propagación y Corrosión.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión del concreto armado es la causa principal del deterioro prematuro y de fallas en la estructura, además, generando perdidas en la industria y de vidas humanas (Sosa Baz, M., et al, 2015). Entre las causas externas tenemos los contaminantes (gaseosos, aerosoles y partículas) que junto con los factores meteorológicos (humedad, lluvia, niebla y rocío) determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, potenciando a menudo sus efectos al actuar simultáneamente. Por ejemplo, el aerosol conteniendo iones cloruro (Cl-), y el dióxido de azufre gaseoso (SO_2) son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera (ISO 9223:2012).

En el caso del concreto reforzado los dos contaminantes que provocan mayor afectación son los iones cloruros y el dióxido de carbono gaseoso (CO_2). Cuando los iones cloruros alcanzan concentraciones críticas en la superficie del acero reforzado, comienza el proceso de corrosión (Sosa, M., 2011). El CO_2 carbonata el concreto y cambia en alto grado sus propiedades, provocando la pérdida de pasividad del acero.

El deterioro de estructuras de concreto reforzado tiene un costo de 300,000 millones de dólares por falla en la infraestructura en los Estados Unidos de América y es posible evitar pérdidas de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión (Pérez López, T., et al, 2001); Además, la inversión por mantenimiento y rehabilitación de edificios no habitacionales en 2019 para Campeche fue de 16,000,000 según el Presupuesto de Egresos de la Federación 2019.

Existen diversos métodos para retardar o prevenir la corrosión, como los inhibidores, son sustancias químicas o naturales que cuando se añade al concreto en pequeñas concentraciones inhibe o prolonga el tiempo del inicio de la corrosión. Este método es la mejor opción dado que su costo es bajo, fácil de operar, y presenta un excelente efecto de resistencia ante la corrosión. Actúan estabilizando la superficie del acero formando una película protectora y reduciendo la permeabilidad (a menudo reaccionan con el concreto) (Lee H., et al, 2018).

El presente trabajo utiliza métodos electroquímicos para evaluar la posible acción inhibidora del mucílago (además del polisacárido hay otros componentes y hasta ahora no podemos garantizar que el efecto inhibidor se deba solo al polisacárido, pudiera también ser otro componente o

ISSN en trámite

mezclas de componentes) solubles derivados del aloe vera empleada en una solución modelada en medio alcalino y en presencia de iones de cloruro para proteger al concreto reforzado y posteriormente, a mejorar la durabilidad y mantenimiento de estructuras de concreto reforzado.

2. ANTECEDENTES

La corrosión es la destrucción o deterioro de un material a causa de su combinación o reacción con el medio ambiente. Dado que la corrosión en el acero de refuerzo en estructuras de concreto genera efectos negativos significativos en el servicio de vida (durabilidad).

Existen diversos métodos apropiados y eficientes para la protección contra la corrosión como los recubrimientos de superficies para concreto, recubrimientos del acero de refuerzo, protección catódica e inhibidores de corrosión (Lee H, et al, 2018); Actualmente, los inhibidores de corrosión son la mejor opción dado su costo, fácil operación y excelente efecto de resistencia ante la corrosión.

Los inhibidores son sustancias químicas que cuando se añade al concreto en pequeñas concentraciones inhiben o prolongan el tiempo del inicio de la corrosión; Para concreto reforzado los inhibidores deben fortalecer la capa pasivante, evitando la entrada de cloruros y la disminución de alcalinidad.

El aloe vero es una planta de hojas gruesas con piel de color verde y contiene un gel transparente en su interior; dicho gel, se conoce como mucilago que contiene como principal constituyente al polisacárido.

En (Kumar H. (2018)) se reportó que el porcentaje de eficiencia de inhibición de la corrosión aumenta con el aumento de la concentración del Aloe vera, es decir, actúa como inhibidor verde de tipo mixto para acero dulce a 5M HCl.

En (Mehdipour, et al., (2014) se probó que el extracto del aloe como protección contra la corrosión del acero inoxidable en solución 1.0M de H2SO4 demostrando la eficacia del extracto a medida que aumenta la concentración.

En (Weiwei et al. (2020)) se estudió al polisacárido del aloe vera como un inhibidor mixto, eficaz y biodegradable para acero dulce en medio ácido usando HCl 15% simulando los yacimientos petrolíferos.

En (Torres et al. (2020)) se estudió que el derivado del nopal produjo resultados superiores en el concreto (medio alcalino) obstruyendo los poros de la matriz del cemento, deteniendo el transporte de agua y cloruro al concreto generando mejoría en la durabilidad.

Actualmente, no existen reportes sobre el uso del mucílago del aloe vera como inhibidor en medio alcalino.

3. DESARROLLO

3.1 Elaboración de Soluciones

Se emplearon soluciones de volumen 154.6 ml para las celdas electroquímicas; Se utilizaron 3 tipos de soluciones, 1ra la solución madre (sin cloruro), 2da el blanco (con cloruro) y la 3ra muestra (con inhibidor).

Se estudiaron diversas concentraciones para las soluciones:

Tipos de Soluciones	
Madre	$Ca(OH)_2 + KOH$
Blanco	$Ca(OH)_2 + KOH + NaCl$
Muestra	$Ca(OH)_2 + KOH + NaCl$ + Inhib.

Tabla 1. Composición de Soluciones

[Cl-]/[OH-]	Solución	Concentración
0	Madre	-
1.6	Blanco	Cl^- =1%
		Cl^- = 3.5%
5.6	Aloe Industrial	200ppm
		300ppm
		400ppm
	Aloe Natural Fresco	200ppm
		300ppm
		1000ppm
	Aloe Natural Oxidado	1000ppm

Tabla 2. Concentraciones estudiadas (Madre, Blanco e Inhibidor)

3.2 Curvas de Polarización Potenciodinámicas

Son diagramas que presentan el comportamiento de las reacciones anódicas y catódicas en el proceso corrosivo en un determinado rango de potencial. Con estas curvas se puede estudiar la cinética y los mecanismos de reacción del proceso de corrosión.

ISSN en trámite

Esta técnica consiste en aplicar un barrido de potencial en un rango seleccionado y a una velocidad de barrido constante, registrando y graficando la corriente generada entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar; Las curvas de polarización potenciodinamicas obtenidas es la representación gráfica del potencial aplicado con respecto al electrodo de referencia versus la densidad de corriente generada.

Generalmente, para evaluar inhibidores para acero de refuerzo del concreto se determinan los cambios en potenciales (Ecorr, Epic y Erep). En las pruebas de curvas de polarización se usó un equipo electroquímico marca Solartron para realizar las mediciones. En este caso el espécimen fue polarizado alrededor de -0.500V catódico y anódico con respecto al potencial de corrosión, Ecorr. La velocidad de barrido fue de 5mV/seg, registrando continuamente la corriente con el cambio del potencial. Se prepararon las soluciones y se dejaron reposar 24,48,72 y 96hr después de cada medición.

3.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

Las técnicas de corriente directa son métodos estacionarios que requieren de grandes periodos de tiempo para alcanzar ese estado estacionario, y, por ende, para proporcionar los datos experimentales requeridos; Esta técnica utiliza mediciones de impedancia sobre un intervalo de frecuencias que proporciona gran cantidad de información en estudios fundamentalmente de electroquímico.

La impedancia faradaica, también llamada espectroscopia de impedancia electroquímica, permite distinguir diferentes procesos que se llevan a cabo en la interfase electrodo- medio corrosivo; tales como: 1) Transferencia de carga, 2) Adsorción de compuestos y 3) Fenómenos de transporte de materia, entre otros.

Comúnmente, el comportamiento de los sistemas electroquímicos se caracteriza en términos de circuitos modelo, equivalentes, como: compuestos de elementos pasivos (resistores, capacitores e inductores), un componente dependiente de la frecuencia, impedancia de warburg, donde se encuentran involucrados fenómenos de difusión.

Esta técnica es muy aceptada para el estudio electroquímico en estructuras debido a la exactitud de los valores de resistencia a la polarización encontrados (Rp), con lo cual, nos permite saber la resistencia de un espécimen a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo (inverso a la velocidad de corrosión).

Adicionalmente entrega información fundamental sobre las características del sistema, aunque a veces es difícil de hacer la interpretación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Curvas de Polarización Potenciodinámicas

Primeramente, se analizó la diferencia entre potenciales obtenidos de la solución madre (Ca (OH)2 + KOH) y los blancos (Cl 1% y Cl 3.5%) en medio alcalino de pH 12.6.

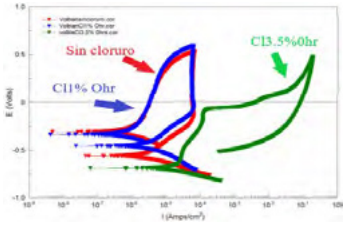


Ilustración 1. Curvas de Polarización obtenidas a O hr de solución madre y blancos (Cl 1% y Cl 3.5%)

Se observó que al aumentar la relación [Cl-]/[OH-] y los tiempos de inmersión los potenciales (Ecorr y Epic) obtenidos se vuelven más negativos que los obtenidos con un cloruro 1%. Y 3.5% a 0hr. Además, que existe un cambio en la corriente pasiva y su pendiente aumenta. Por ende, se probó el efecto significativo del tiempo como una variable que modifica los resultados de esta investigación.

Tabla 3. Resultados obtenidos de la variación blancos

[Cl-] /[OH-]	Solución	Concentra-ción	t	Ecorr	Epit	Erep
			hr	V		
0	Madre	-	0	-0.55	-0.20	-0.30
1.5	Blan-co	1%	0	-0.45	-0.20	-0.29
5.6		3.5%	0	-0.69	-0.07	-0.51

(Cl 1% y Cl 3.5%)

Tabla 4. Resultados obtenidos de Cl 3.5% de 0- a 96 hr.

[Cl-]/ [OH-]	Soluci ón	Concen tración	t	Ecorr	Epit	Erep
			hr	V		
5.6	Blan-co	3.5%	0	-0.69	-0.07	-0.51
			96	-0.89	-0.11	-0.51

Se obtuvo un efecto significativo del aloe industria y natural con respecto al blanco (Cl3.5%) en las primeras mediciones. Por lo cual, se analizó a diferentes concentraciones de soluciones inhibidoras tomando como referencia los blancos con tiempos de inmersión de 0 – 96hr obteniendo los siguientes resultados:

ISSN en trámite

Tabla 5. Resultados obtenidos de curvas de polarización del extracto industrial y natural a 96hr

Solución	Concentración	t	IE	Ecorr	Epit	Erep
		hr	%	V		
Blanco	3.5%	96	-	-0.89	-0.11	-0.51
Industrial	200 ppm	96	80	-0.68	0.01	-0.40
	300 ppm	96	20	-0.88	0.04	-0.49
	400 ppm	96	53	-0.69	0.01	-0.53
Natural	200 ppm	96	43	-0.69	0.23	-0.50
	300 ppm	96	93	-0.41	0.50	-0.35
	1000 ppm	96	87	-0.66	0.13	-0.51

Mediante las curvas de polarización se pudo determinar que el Epic cambio a valores más positivos (>0.13) en la solución Natural que, en el Industrial (0.01- 0.04); Además, la IE es mayor en la Natural (93 y 87%) que con el Industrial (53 y 80%); Los resultados obtenidos de las curvas de polarización muestran que se obtuvieron mejores resultados en las soluciones de Aloe Vera Natural (extracto natural) que en las soluciones de Aloe Vera Industrial (extracto químico).

De igual manera, se analizó si al cortar una hoja de la planta del aloe vera que se deja reposar al aire libre después de cortar suponiendo que hay un proceso de oxidación, dado que su color cambia y su peso disminuye. Por ende, se analizó el efecto después de las 96 horas expuesto del aloe natural obteniendo los siguientes resultados:

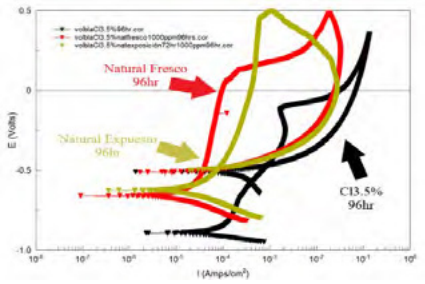


Ilustración 2. Curva de polarización obtenida de extracto natural fresco y expuesto al ambiente a 1000ppm a 96hr

Se analizó diversas soluciones inhibidoras con la utilización del aloe vera natural expuesto al ambiente a 3 tiempos y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados obtenidos de curvas de polarización de extracto fresco y expuesto a 72hr en el ambiente a 1000ppm

Solución	Concentración	t	Ecorr	Epit	Erep	IE
		hr	V			%
Blanco	3.5%	96	-0.89	-0.11	-0.51	-
Natural fresco	1000 ppm	96	-0.66	0.13	-0.51	87
Natural expuesto	1000 ppm	96	-0.62	0.44	-0.49	73

Tabla 7. Resultados obtenidos del natural expueto a 72 hr en el ambiente con 3 diferentes tiempos

Solución	Concentración	t	Ecorr	Epit	Erep	IE
		hr	V			%
Blanco	3.50%	96	-0.89	-0.11	-0.51	-
Nat. expuesto	1000ppm	96	-0.62	0.44	-0.49	73
		121	-0.70	0.36	-0.40	83
		144	-0.55	0.41	-0.45	78

Se observo que conforme pasa el tiempo la solución inhibidora con aloe expuesto al ambiente mejora significativamente el Epic (0.36 -0.44V) y los potenciales de Ecorr – Erep disminuyen su negatividad (-0.89 a -0.55V) y (-0.51 a -0.45V) con respecto al efecto del Cl3.5% (blanco). Además, para poder determinar el potencial de picadura (Epic), potencial en el cual la densidad de corriente se incrementa después de una zona pasivase, tomando como referencia este concepto se aprecia que la pendiente que representa el cambio de densidad de corriente (Epic) se hace más corta dicha sección del natural oxidado a diferencia de la presentada en la solución inhibidora del natural fresco.

4.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

Para este trabajo se empleó un circuito equivalente, compuesto por Rs (resistencia a la solución), Rp (resistencia a la polarización/transferencia de carga), CPE (elemento de fase constante) y Wa (warburg); Mediante el diagrama de Nyquist se puede visualizar que hay un proceso de difusión, por ende, se utiliza el Wa (warburg) para su interpretación.

Se analizó la impedancia tomando como referencia el Ecorr y encontramos una contradicción en los resultados, observando que se obtuvieron valores mucho mayores en la Rp del aloe industrial (2497 – 8589 ohm) en comparación del aloe natural (fresco) (3391 ohm).

ISSN en trámite

Además, la IE en la solución inhibidora de aloe industrial es mayor (55 – 87%) que en la solución de aloe natural

Solución	Concen-tración	t	Rp	IE
		hr	ohm	%
Blanco	3.50%	96	1131	-
Nat. exposición 72hr	1000 ppm	96	8050	86
		121	1406	20
		144	2661	57

(67%); De igual forma se puede apreciar que la mayor IE se obtiene en concentraciones pequeñas (200 y 300 ppm) del aloe industrial contenida en la sig. tabla:

Tabla 8. Resultados obtenidos de impedancia del extracto industrial y natural a 96hr

Sol.	Concen-Tración	t	Rp	IE
		hr	Ohm	%
Madre	-	0	16120	-
Blanco	3.50%	96	1131	-
Indus-trial	200ppm	96	8589	87
	300ppm	96	8041	86
	400ppm	96	2497	55
Natu-ral	200ppm	96	366	-
	300ppm	96	21	-
	1000ppm	96	3391	67

Igualmente, se puede apreciar que la Rp obtenido en las soluciones inhibidoras (aloe industrial y aloe natural) (2497-8589) (3391) es mucho mayor que la obtenida en la solución blanco (Cl3.5%) (1131).

De igual manera, que en las curvas de polarización se estudió con impedancia las soluciones inhibidoras de aloe natural expuesto al ambiente y se compararon para poder visualizar si existe diferencia significativa entre el que se midió recién cortado y el que se dejó expuesto al ambiente. Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 9. Resultados obtenidos de impedancia con extracto natural fresco y expuesto a 72hr en el ambiente a 1000ppm a 96 hr

Solución	Concen-tración	t	Rp	IE
		hr	ohm	%
Blanco	3.5%	96	1131	-
Natural fresco	1000 ppm	96	3391	67
Natural expuesto	1000 ppm	96	8050	86

Se observo que aumenta la Rp en la solución expuesta al ambiente (8050 ohm) mucho mayor que la obtenida con el natural fresco (3391 ohm). Además, la IE obtenida aumenta en la solución expuesta al ambiente (86%) pudiendo visualizar una diferencia significativa con respecto a la del natural fresco (67%). Por ende, existe una diferencia significativa entre ambas soluciones inhibidoras del aloe natural a 96 hr de reposo.

Tabla 10. Resultados obtenidos de la impedancia del aloe natural expuesto al ambiente de 9-144 hr

Se observa que no existe una tendencia exacta al medirse la impedancia con respecto al Ecorr y por ende, la IE obtenida de 96 – 144 hr disminuye 86 – 57% y la Rp de 96 – 144 hr disminuye de 8050 a 2661 ohm.

5. CONCLUSIONES

Como se observa en las tablas anteriores existe un notable efecto del mucílago natural de aloe vera sobre el potencial de picadura del acero en medio alcalino, lo que hace posible que pueda constituir un inhibidor de corrosión picadura en medio alcalino que logre retardar o prolongar la nucleación y propagación de la corrosión. Se obtiene una mayor eficiencia inhibidora determinada mediante las curvas de polarización potenciodinamicas en comparación de la impedancia electroquímica.

Mediante las técnicas electroquímicas se demostró que el efecto inhibidor del mucílago se incrementa al aumentar el tiempo de exposición u oxidación al ambiente comparado con el aloe natural recién cortado o fresco. Este presenta valores positivos, pero mucho más pequeños en la EI y Epic; También, se pudo determinar que empleando una solución expuesta al ambiente los valores del Ecorr y Erep mejoran considerablemente.

Además, la región activa de la picadura (Epic) se ve afectada al utilizar una solución natural oxidada que logra reducirse en comparación con la solución inhibidora natural fresca (sin oxidación) estudiada.

El empleo de un inhibidor verde natural que ayude a prolongar el proceso de nucleación y propagación de la picadura a valores mucho más positivos en un ambiente alcalino representa un punto clave ante el fenómeno de corrosión. Se continúa investigando la posibilidad de que pueda utilizarse como inhibidor del acero de refuerzo del concreto en zonas costeras, además, de poder definir la tendencia exacta con la cual trabaja y el tipo de mecanismo inhibidor que posee.

ISSN en trámite

6. AGRADECIMIENTOS

A. Carrillo agradece el apoyo económico otorgado a través del programa de CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y tecnología) por su apoyo económico y estudiar un posgrado en investigación.

Agradezco a la UAC (Universidad Autónoma de Campeche) por permitirme trabajar en este proyecto con el PNPC (programa nacional de posgrados de calidad) en el laboratorio CICORR (Centro de Investigación en Corrosión) ubicado en Campeche.

Agradezco al Dr. Francisco E. Corvo Pérez y el Dr. García O. Esteban Miguel por ser mis asesores en este trabajo de investigación.

Agradezco a CENIDET (Tecnológico Nacional de México) por aceptar mi trabajo de investigación de la 8a. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada.

7. REFERENCIAS

Andrade, C., Alonso, C., Sarria, J. (1998). Influencia de la humedad relativa y la temperatura en las velocidades de corrosión de estructuras de hormigón. *CSIC Materiales de construcción,* Vol. 48, Núm. 251, Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja".

Chang, X., Chen, B. (2011). Water-soluble polysaccharides isolated from skin juice, gel juice and flower of Aloe vera Miller. *Elsevier. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 42. Pages 197–203.

Del V. A., Pérez, T., Martínez, M. (2001). El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Sanfandila,* Qro, 2001. Publicación Técnica No. 182

García, Y., Méndez, W., Quiñones, E. (2016). Evaluación de la corrosión de acero de refuerzo frente al ambiente salino y ensayo preliminar de un eco inhibidor para retardar el proceso de corrosión. Universidad de Cartagena Tesis para obtener el grado.

Herrera, H., Franco, M., Miranda, José., Hernández, E., Espinoza, A., Fajardo, G. (2015). Gel de aloe-vera como potencial inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo estructural. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 6, núm. 3, pagina 9-23.

Karish, K., Vikas, Y. (2018). Aloe vera L. as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 5.0 M Hydrochloric Acid Solution. *Asean Journal of Chemistry*. Vol. 30, No. 3. Pages 474-478.

Meddipour M., Vashi, R., Chaudhari, H.(2014). The Study of Aloe-Vera gel Extract as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Acetic acid. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.* Vol. 6, Issue 11. Pages 22081-22091.

Ndibe, M., Menkiti, M., Ijomah, M., Onukwuli, D., Ejikeme, P. (2018). Acid extract of aloe vera as inhibitor for the corrosion of mild steel in acidic media. *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol. 17, No. 12, Pages 2847-2856.

Olguin, F. (2007). Caracterización de la resistencia electroquímica utilizando técnicas de CD y CA en el sistema acero-concreto. *CINA (Centro de investigación en materiales avanzados, S.C. Posgrado*). Tesis que como requisito para obtener El Grado de Doctor en Ciencias De Materiales.

Ormellese, M., Lazzari, L., Goidanich, s., Fumagalli, G., Brenna, A. (2009). A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete. *Elvesier. Corrosion Science* 51. Pages 2959–2968.

Ramírez, K. (2018). Evaluación electroquímica del efecto inhibidor del aloe vera en sistemas acero aisi sae 1045 – salmuera. *Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de ingeniería mecánica*. Tesis para obtener título de ingeniera mecánica.

Saremi, M., Mahallati, E. (2002). A study on chloride-induced depassivation of mild Steel in simulated concrete pore solution. *Pergamon. Cement and Concrete Research* 32. Pages 1915–1921.

Torres, A., Díaz, L. (2020). Concrete durability enhancement from nopal (opuntia ficus-indica) additions. Elsevier. *Construction and Building Materials* 243. Pages 118170- 118178.

Tejeda, L., Meza, P., Altamiranda, E., y Berrocal, M., (2014). Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. *Elvesier. Información Técnica*. Vol. 78, Núm. 2, Pags.155- 164.

Zhang, W., Yao, M., Liwei, C., Li-Juan, W., Yan-Chao, W., Hui-Jing, L. (2020). Aloe polysaccharide as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild Steel in simulated acidic oilfield water: Experimental and theoretical approaches. Elsevier. *Journal of Molecular Liquids* 307. Pages 1-12.

ISSN en trámite

Comparative Study of CFD Software for Numerical Simulation of Multiphase Flows in Secondary Metallurgy ⋆

Herrera-Ortega M. * **Ramos-Banderas J. A.** *
Hernández-Bocanegra C. A. ** **Beltrán A.** ***

* *TecNM Campus Morelia, Av. Tecnológico 1500, Morelia Michoacán, 58120 México (e-mail: mario.heortega@gmail.com, jose.rb@morelia.tecnm.mx).*
** *Cátedras-CONACyT, Av. Insurgentes Sur 1528, CDMX, 03940 México (constantin.hb@morelia.tecnm.mx)*
*** *Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Mich., 8701, 58190 México (albem@materiales.unam.mx).*

Abstract: In the present work a comparison of two softwares (comercial and open source) was made, for the numerical simulation of a multiphase flow comprising water-oil-air of a physical model of a ladle furnace used in secondary refining of steel. The results of the simulations were compared and validated with photograms of the oil aperture in the physical model. From the results, it was found that the fluid dynamic structure for both software is very simila; however, the structure of the oil aperture as well as the percentage area of exposed water differs, from one software to the other.

Keywords: CFD, water-oil-air flow, multiphase flow, OpenFOAM, Fluent.

1. INTRODUCTION

The principal aim of steel refining is to control the amount of impurities and nonmetallic inclusions, to achieve the desired chemical composition and to reach a proper temperature for the subsequent continuous casting process. Purging with an inert gas by means of porous plugs located in the bottom of the ladle creates a two phase column made up of bubbles containing kinetic energy. The accelerated bubbles generate a recirculating pattern which led to the homogenization of temperature and composition of melt, and also improves the floatation of nonmetallic particles to the top slag. However, the intensity of the momentum exchange between the two phases creates an opening in the slag layer which is detrimental to steel quality. With the growth of secondary steelmaking the interest on the mixing rate, the slag layer opening and the elucidation of the mechanism that govern the multiphase flow involved in this process, several investigations have been carried out. Some studies have focused on the influence of slag thickness (Jardón-Pérez et al., 2019) as well as the properties of slag (Amaro-Villeda et al., 2014), gas flow rate and number and location of injections of inert gas at the bottom of the ladle (Liu et al., 2011; Villela-Aguilar et al., 2020; Tan et al., 2020).

The aforementioned works reported on the literature have used commercial software to solve the equations that govern transport phenomena involved in the secondary refining process. These codes are strong technological tools and most of them are closed source software, i. e. proprietary software with the right to use, modify or share reserved to the software publisher (Liberman, 1995). Open source software as a counterpart as O'Reilly (1999) observes, is a code which is available for use, modification and redistribution without any restriction and free of charge. This type of license permit the creation of derivative works redistributed under the same terms as the original software.

OpenFOAM is license free, open source computer fluid dynamics (CFD) software (Weller et al., 1998). The works reported in literature that use OpenFOAM to solve multiphase flow present in secondary refining process are less than those reported using closed source commercial software. Kulju et al. (2015) validate a three-phase model based on a multi-fluid approach which combines the Eulerian bubble model included in OpenFOAM library and the volume of fluid (VOF) interface tracking method. They validate the results by comparing a dimensionless open-eye area with values reported in literature by Kr-

⋆ The present work has been funded by the program Becas Nacionales funded by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

ISSN en trámite

ishnapisharody and Irons (2006). From the results the authors conclude that the multi-fluid model produces a more realistic description of the plume region and the interaction of the slag with the argon and steel phases. Liu et al. (2014) developed a numerical model which takes into account the multiphase flow and the bottom stirring in a ladle with a centered injection by means of the multiphase solver available in OpenFOAM library. The model predicts the flow in accordance with reported data by means of non-dimensional slag eye areas and transient analysis of slag eye area for different argon flow rates. Horvath et al. (2009) made a comparison of bubble column flow using two implementations of the volume of fluid (VOF) model. They found that the computational cost difference between software is not negligible and tends to favour open source software due to the lack of graphical user interface (GUI). The two formulations of the VOF model use different schemes for the solution of the discretized equations and therefore results of sharp interfaces can be different in structure.

The aim of the present work is to compare two different software, commercial and open source, with the purpose to offer an alternate solution due to differences both in use and modification of the code and to reduce license costs in future research regarding CFD simulations of industrial processes. In order to do so simulations of an air stirred physical model, comprised of water and oil to simulate the slag and steel phase are performed using both OpenFOAM and Fluent solvers. Experimental data reported in previous work (Herrera-Ortega et al., 2021) are used to validate both simulations.

2. METHODOLOGY

2.1 Physical Model Design

For the validation of the slag opening resulting from numerical simulations a 1/6 scale conical ladle made of acrylic was used. Water and mineral oil were used as working fluids to simulate the steel and slag phases respectively. The phases as well as the boundary conditions are shown in Figure 1.

The water is stirred by injecting air through a nozzle located in the mid radius of the bottom diameter of the vessel. The air flow rate in the scale model was determined by means of the Froude number (Krishnapisharody and Irons, 2013) expressed in Eq. (1).

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)^2 = \left(\frac{\rho_g}{\rho_a}\right)\left(\frac{\rho_w}{\rho_s}\right)\left(\frac{d_m}{d_p}\right)^4\left(\frac{H_m}{H_p}\right), \qquad (1)$$

where subscripts m and p are representative of the model an the prototype, respectively, Q is the volumetric flow of the injected gas, $m^3{\cdot}min^{-1}$, d is de diameter of the nozzle, m; H, is the height of liquid, m; ρ_g, ρ_a, ρ_w, and ρ_s are the densities of argon, air, water, and steel, respectively.

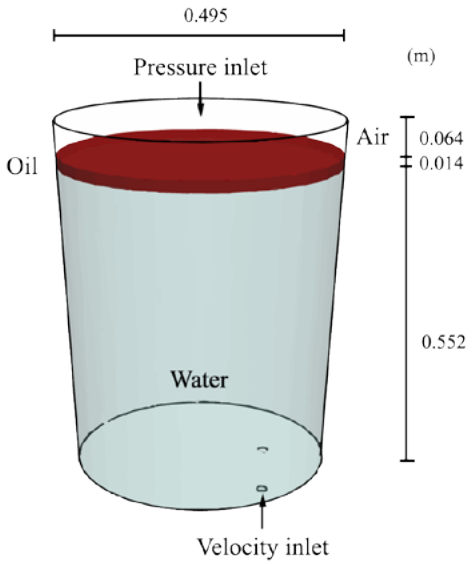


Fig. 1. Phases and boundary conditions used during the numerical simulations.

For the analysis of the slag eye area, images were taken from the top view of the physical model and extracted every second until the bath reaches a quasi-stable state. Then processed with the help of image processing software. The experimental setup is shown in Figure 2.

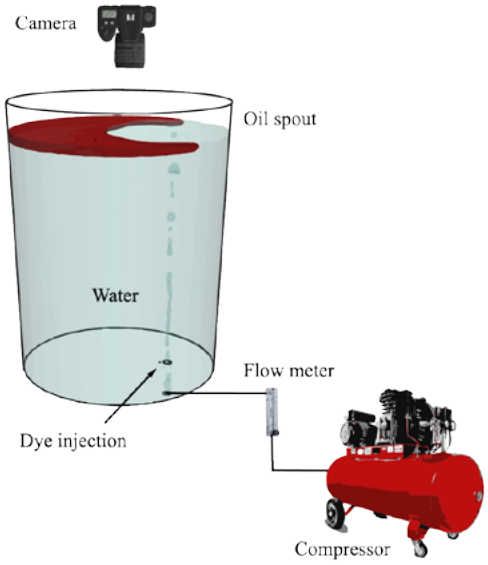


Fig. 2. Experimental setup of the physical scale model.

ISSN en trámite

2.2 Numerical Model

The computational domain for the simulations was made from the dimensions of the physical model listed in Table 1.

Table 1. Dimensions of the physical model.

Parameter	Dimension, m
H_w	0.552
H_o	0.014
H_n	0.083
D_t	0.495
D_b	0.467
D_n	0.020
r/R	0.118

where H_w is the height of water, H_o is the thickness of the oil layer, H_n is the height of the nozzle entry, D_t and D_b are the top and bottom diameter of the conical vessel, respectively; D_n is the diameter of the nozzle and r/R is the location of the nozzle with respect to the bottom diameter of the vessel.

The properties of the materials used in the numerical simulations of the multiphase system are listed in Table 2.

Table 2. Properties of the materials used in the simulations.

Material	Density $kg \cdot m^{-3}$	Viscosity $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	Surface Tension $N \cdot m^{-1}$
Water	998.2	0.001003	-
Air	1.225	1.7894×10^{-05}	-
Oil	889	0.1589	-
Interface			
Water-Oil	**	**	0.04
Water-Air	**	**	0.072
Air-Oil	**	**	0.021

**Calculated by means of Eq. (5)

The following assumptions were considered in the present work:

- The fluids contained in the ladle behave as Newtonian.
- The flow is completely turbulent.
- Non-slip conditions for velocity occurs on all walls.
- Surface tension modelling is taken into account.
- Constant gas flow rate.
- Isothermal state in all simulations.

The discretization of the solution domain were made using two approaches depending on the software used. For the simulation run in ANSYS Fluent a structured hexaedrical mesh of 538,690 elements was used in contrast to the 789,215 element mesh generated by OpenFOAM library *snappyHexMesh* on which two levels of refinement were made in the plume zone and the slag zone. Both meshes are shown in Figure 3.

Both simulations used the volume of fluid (VOF) model on which the transport equation for the volume fraction of each phase is solved simultaneously with the continuity



a) ANSYS Meshing b) OpenFOAM

Fig. 3. Spatial discretization made with both software for comparison study.

and momentum equations. The VOF model consider two or more inmiscible fluids as one effective fluid in the whole domain on which the properties are calculated as weighted averages based on the distribution of the volume fraction. The volume fraction is defined by Eq. (2)

$$\sum_{q=1}^{n} \alpha_q = 1. \tag{2}$$

The continuity equation for the volume fraction of each one of the phases is defined by Eq. (3)

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q\right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q \boldsymbol{v}_q\right) = 0, \tag{3}$$

where ρ_q is the density for phase q, α_q is the volume fraction occupied by the phase q within the cell; and $\boldsymbol{q}$ is the velocity.

A single momentum equation is solved, the resulting velocity field is shared between the phases present along the numerical domain. It is shown that Eq. (4) depends on the volume fraction of all phases through the properties ρ and μ.

$$\begin{aligned} \tfrac{\partial}{\partial t}\left(\rho \boldsymbol{v}\right) + \nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{v} \boldsymbol{v}\right) &= -\nabla p \\ &+ \nabla \cdot \left[\mu\left(\nabla \boldsymbol{v} + \nabla \boldsymbol{v}^T\right)\right] + \rho \boldsymbol{g}\,, \end{aligned} \tag{4}$$

where ρ is the density, μ is the viscosity, ∇p is the pressure gradient, and $\boldsymbol{g}$ is the acceleration of gravity. The properties of the mixture, such as density and viscosity are calculated for the volume fraction and the properties of each phase x_q by Eq. (5)

ISSN en trámite

$$x = \sum \alpha_q x_q. \tag{5}$$

To model the turbulence closure of the Navier-Stokes equations the standard $k-\varepsilon$ model with standard wall functions was used, which solves two transport equations for the turbulence kinetic energy, k; and the rate of dissipation of turbulent kinetic energy, ε, which are expressed by Eqs. (6) and (7).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \boldsymbol{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \nabla k\right] + G_k + G_b - \varepsilon\rho, \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \boldsymbol{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \nabla \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{7}$$

here G_k, is the generation of turbulent kinetic energy due to the average of velocity gradients; G_b is the generation of turbulent kinetic energy due to the buoyancy forces; μ_t is the turbulent viscosity; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$, and $C_{3\varepsilon}$ are empirical constants whose values are 1.44, 1.92, and 1.0 respectively; σ_k and $\sigma\varepsilon$ are the turbulent Prandtl number for k and ε whose values are 1.0 and 1.3, respectively.

3. RESULTS

3.1 Fluid Dynamics

The two phase zone called plume is formed due to the kinetic energy of the air bubbles injected from the bottom nozzle. Bubbles ascend and get deflected as soon as they reach the oil layer surface. This creates a recirculating pattern that goes down along the vessel walls and goes up again.

In the contours plot shown in Figure 4 velocity magnitude for both simulation can be observed, in which there is almost the same magnitude and structure for both calculations; however, the structure of the gas phase is more realistic for the calculation using OpenFOAM. This is due to the second level refinement in the plume and oil zones. Therefore the alpha fraction for the air phase shows a better resolution as it depends on the level of refinement; poor cell quality results in numerical diffusion of the air fraction calculation which can lead to unphysical results.

In Figure 5 contours lines colored by velocity magnitude are shown, in which a single dominant recirculation is observed, located in the axis of symmetry. This is due to the buoyant movement of the bubbles that are accelerating from the bottom nozzle to the top oil layer. There is a good agreement between the structures calculated by both commercial and open source software.

3.2 Slag Eye Opening

The opening of the slag layer was simulated by means of numerical simulations and physical modeling. The results of the physical modeling of the slag eye opening were

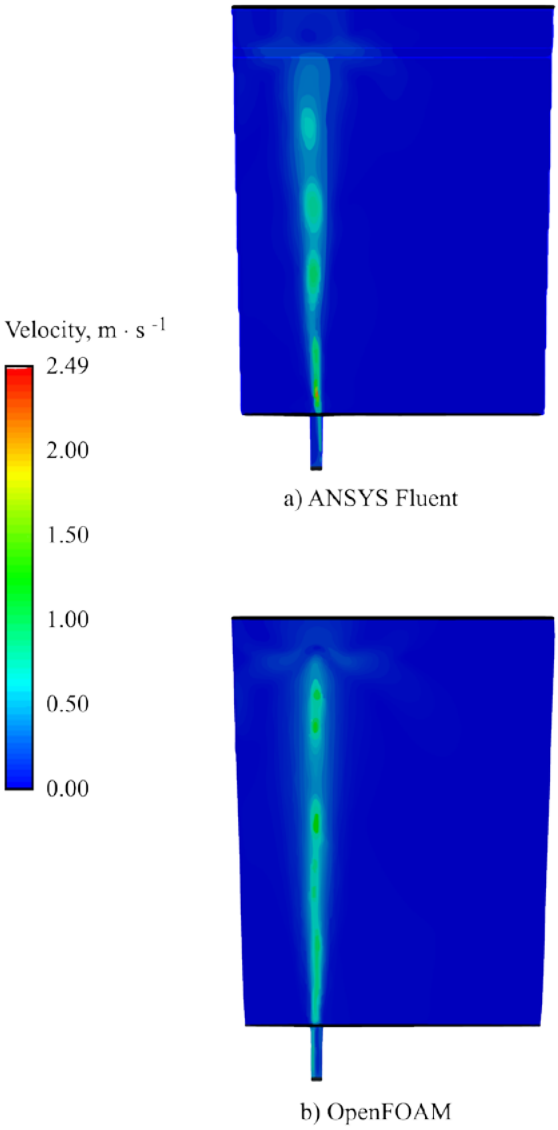


Fig. 4. Contours colored by velocity magnitude.

processed using the software ImageJ to stack several photogram into one single image and then an analysis of median of contrast to get an averaged image of the transient movement of the spout was performed. In Figure 6 the opening shape of the slag layer can be observed for both calculations and it is evident that the calculations performed with OpenFOAM have more concordance with the physical model than that with ANSYS Fluent. This can be due to the different schemes used for solving the α fraction. OpenFOAM uses an interface compression method whereas Fluent uses the Geo-Reconstruct method for sharp interfaces. There is also the fact that for the

ISSN en trámite

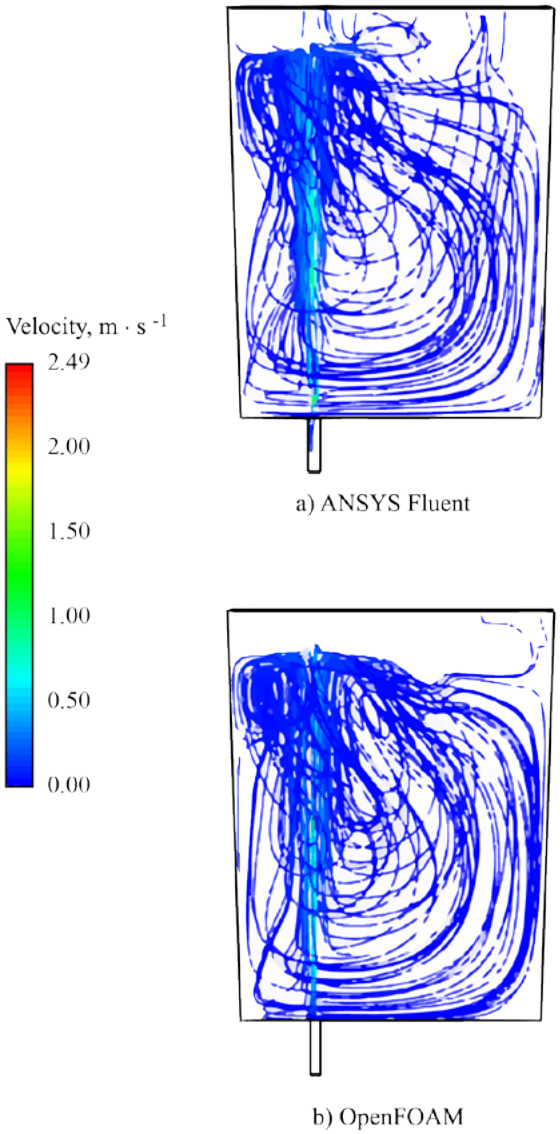


Fig. 5. Streamlines colored by velocity magnitude.

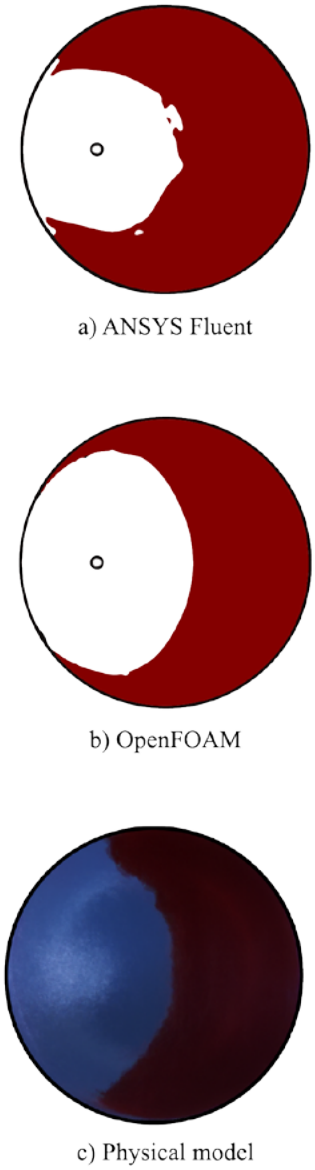


Fig. 6. Comparison of oil layer aperture from numerical simulations and physical modeling.

experimental analysis the final image is a mean representation of the flow and is hard to compare with the time-step solution from ANSYS Fluent.

4. CONCLUSION

A comparison of commercial and open source software was carried out on a multiphase numerical simulation of a physical ladle furnace model. The numerical simulation was validated by computing the slag eye opening through a physical scale model. The fluid dynamic structure is very similar for the two simulations showing the dominant recirculation however the results obtained with ANSYS Fluent has more resolution near the walls in comparison with those obtained with OpenFOAM. Slag eye opening structure is observed to be more similar to the results obtained trough OpenFOAM.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to acknowledge to the TecNM-ITM, CATEDRAS-CONACyT, IIM-UNAM Campus Morelia, CONACyT and SNI for the permanent support to the academic group of Modeling of Metallurgical Processes.

ISSN en trámite

REFERENCES

Amaro-Villeda, A.M., Ramirez-Argaez, M.A., and AN, C. (2014). Effect of slag properties on mixing phenomena in gas-stirred ladles by physical modeling. *ISIJ international*, 54(1), 1–8.

Herrera-Ortega, M., Ramos-Banderas, J.Á., Hernández-Bocanegra, C.A., and Montes-Rodríguez, J.J. (2021). Effect of the location of tracer addition in a ladle on the mixing time through physical and numerical modeling. *ISIJ International*, 61(8), 2185–2192.

Horvath, A., Jordan, C., Lukasser, M., Kuttner, C., Makaruk, A., and Harasek, M. (2009). CFD simulation of bubble columns using the vof model-comparison of commercial and open source solvers with an experiment. *Chemical Engineering Transactions*, 18, 605–610.

Jardón-Pérez, L.E., González-Morales, D.R., Trápaga, G., González-Rivera, C., and Ramírez-Argáez, M.A. (2019). Effect of differentiated injection ratio, gas flow rate, and slag thickness on mixing time and open eye area in gas-stirred ladle assisted by physical modeling. *Metals*, 9(5), 555.

Krishnapisharody, K. and Irons, G. (2013). A critical review of the modified froude number in ladle metallurgy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(6), 1486–1498.

Krishnapisharody, K. and Irons, G.A. (2006). Modeling of slag eye formation over a metal bath due to gas bubbling. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37(5), 763–772.

Kulju, T., Ollila, S., Keiski, R.L., and Muurinen, E. (2015). Validation of three-phase cas-ob cfd-model. *IFAC-PapersOnLine*, 48(17), 1–5.

Liberman, M. (1995). Overreaching provisions in software license agreements. *Richmond Journal of Law & Technology*, 1(1), 4.

Liu, H., Qi, Z., and Xu, M. (2011). Numerical simulation of fluid flow and interfacial behavior in three-phase argon-stirred ladles with one plug and dual plugs. *Steel research international*, 82(4), 440–458.

Liu, Y.H., He, Z., and Pan, L.P. (2014). Numerical investigations on the slag eye in steel ladles. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 834103.

O'Reilly, T. (1999). Lessons from open-source software development. *Communications of the ACM*, 42(4), 32–37.

Tan, F., He, Z., Jin, S., Pan, L., Li, Y., and Li, B. (2020). Physical modeling evaluation on refining effects of ladle with different purging plug designs. *steel research international*, 91(6), 1900606.

Villela-Aguilar, J.d.J., Ramos-Banderas, J.Á., Hernández-Bocanegra, C.A., Urióstegui-Hernández, A., and Solorio-Díaz, G. (2020). Optimization of the mixing time using asymmetrical arrays in both gas flow and injection positions in a dual-plug ladle. *ISIJ International*, ISIJINT–2019.

Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., and Fureby, C. (1998). A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in physics*, 12(6), 620–631.

Appendix A. NOMENCLATURE

A.1 Symbol Description

$C_{1-3\varepsilon}$:	Turbulence model constants.
d_m:	physical model diameter, m.
d_p:	Full scale prototype diameter, m.
$\boldsymbol{g}$:	Gravitational acceleration, $m \cdot s^{-1}$.
G_b:	Generation of turbulence kinetic energy due to buoyancy.
G_k:	Generation of turbulence kinetic energy due to velocity gradients.
H_m:	Physical model bath height, m.
H_p:	Full scale prototype bath height, m.
k:	Turbulent kinetic energy, $J \cdot kg^{-1}$.
p:	Pressure, Pa.
Q_m:	Physical model gas flow, $Nm^3 \cdot min^{-1}$.
Q_p:	Full scale prototype gas flow, $Nm^3 \cdot min^{-1}$.
$\boldsymbol{v}$:	Velocity, $m \cdot s^{-1}$.

A.2 Greek symbols

α:	Volume fraction.
ε:	Dissipation rate of turbulent kinetic energy, $m^2 \cdot s^{-3}$.
μ:	Molecular viscosity, $Pa \cdot s$.
μ_t:	Turbulent viscosity, $Pa \cdot s$.
ρ:	Density, $kg \cdot m^{-3}$.
ρ_a:	Air Density, $kg \cdot m^{-3}$.
ρ_g:	Argon Density, $kg \cdot m^{-3}$.
ρ_s:	Steel Density, $kg \cdot m^{-3}$.
ρ_w:	Water Density, $kg \cdot m^{-3}$.
σ:	Surface tension, $N \cdot m^{-1}$.
σ_k:	Turbulent Prandtl number for k.
σ_ε:	Turbulent Prandtl number for ε.

ISSN en trámite

Degradación y transformación de residuos lignocelulosicos a azucares por hongos del género Aspergillus

Rios D.N. *Salmeron I.* Perez I.* Perez S.B.* Quintero A.* Cisneros S.*

*Universidad Autónoma de Chihuahua, Circuito No. 1, Chihuahua, Chih., México. C.P. 31240
(Tel: 6564508150; e-mail: diana_nicol@outlook.com).)}

Abstract: Uno de los principales residuos generados en México son los desechos de jardinería; estos residuos están compuestos principalmente de lignina que es una estructura molecular compuestas por azúcares, sin embargo, estos azúcares no se encuentran disponibles para ser utilizados por los microorganismos y aprovechar estos residuos para generar energia y compuestos quimicos de alto valor agregado. En este estudio se evaluarán tres hongos del género aspergillus por fermentacion en medio solido en donde se evaluo el efecto de la humedad sobre la degradacion de lignina y produccion de azucares.

Keywords: Aspergillus, Degradación, Lignina, Residuos de jardinería, azucares.

1. Introducción

Las tecnologías de los biocombustibles, han entrado en un gran dilema con organizaciones ecologistas, debido a la escasez de las tierras para la producción de alimentos. Una solución a esta problemática es el uso de los residuos agrícolas, y residuos sólidos urbanos (RSU), para la producción de bioenergía, mediante la conversión de lignina como lo muestra en la figura 1. (Bugg et al., 2011).

En México se generan 120,128 toneladas de RSU por día, y se estima según la secretaría de medio ambiente que el 10.84% se compone de residuos de jardinería. En el noroeste del país se generan 10,257 ton/día de RSU, del cual el 46.25% son residuos orgánicos. (SEMARNAT, 2020).

La lignina es un polímero aromático que es componente principal de la biomasa vegetal, que representa casi el 30% del carbono orgánico de la tierra. (Feng et al., 2020). La lignina dificulta la utilización de la biomasa vegetal debido a que el alto peso molecular y las fuertes interacciones intramoleculares e intermoleculares de la lignina han hecho que la degradación de la lignina sea muy difícil, impidiendo la liberación e hidrólisis de sustancias como la celulosa, la hemicelulosa y otras. (Feng et al., 2020). Por esta razón se desarrollan diferentes pretratamientos físicos, químicos y biológicos. (Mustafa et al., 2017). Los hongos lignocelulolíticos están adquiriendo un papel cada vez mayor en distintas aplicaciones, con el objetivo de mejorar la biomasa a través de la producción de productos de valor agregado. (Carota et al., 2021)

Recientemente han aparecido más estudios destinados a estudiar la capacidad de los hongos microscópicos para sintetizar varias enzimas del complejo ligninasa, que incluyen la lignina peroxidasa (LiP), la peroxidasa dependiente de manganeso (MnP), y la lacasa. (Ivanova et al., 2022)

La biodegradación de la lignina es un proceso oxidativo, se basa enzimas tipo oxido reductasas, es principalmente extracelular. (Hatakka y Hammel. 2010). Los géneros más famosos de tales microorganismos son Ascomycetes y Deuteromycetes, Penicillium, Aspergillus, trichoderma y fusarium, Altermaria. (Ivanova et al., 2022)

Los hongos saprofitos tienen un sistema lignolítico oxidativo y extracelular único para degradar la lignina y abrir los anillos de fenilo. Las bacterias no son tan eficientes para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica, como lo demuestra un estudio que compara ocho microorganismos, incluidos hongos y bacterias, para el pretratamiento de desechos de caña de azúcar. (Singh et al., 2008).

Para que los hongos inicien la producción de enzimas oxidoreductasas se asociada con las condiciones de metabolismo secundario en respuesta al agotamiento de nutrientes. La lignina peroxidasa degrada unidades de lignina no fenólicas, mientras que MnP genera Mn3+, que actúa como un oxidante difusible en unidades de lignina fenólicas o no fenólicasa a través de reacciones de peroxidación de lípidos, al igual que la lacasa pero utilizando al oxigeno molecular como aceptor de electrones. (Bugg et al., 2011).

Varios miembros pertenecientes al género de Aspergillus tienen una capacidad ampliamente reconocida para degradar la

ISSN en trámite

lignocelulosa y un número creciente de estudios han informado sobre la presencia de enzimas modificadoras de lignina en estas especies. (Carota et al., 2021)

Los objetivos de este estudio son evaluar la eficiencia de la degradación de lignina a partir de pretratamiento fúngico probando tres diferentes especies de hongos lignocelulolíticos y determinar las mejores condiciones para la degradación.

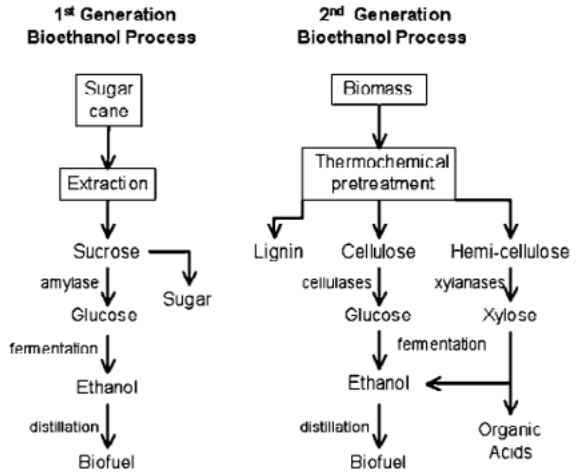


Figura 1. Esquema de producción de biocombustibles. (Bugg et al., 2011).

2. Métodos

2.1 Preparación y caracterización de materia prima

Los residuos de jardinería se recolectaron en la facultad de ciencias químicas de la UACH, debido a la temporada en la que se recogieron las hojas no requirió de un secado. Se trituraron pasándolas por un tamiz de 0.75 mm.

2.2 Preparación de cultivos y de micelio

Se tenían diferentes hongos y esos se cultivaron en agares ricos en celulosa, seleccionando a los 3 hongos con mayor crecimiento. Los hongos seleccionados se diferenciaron como cepa A, B y C. Los hongos A, B y C se continuaron cultivando en placas de PDA para su aislamiento.

El micelio se preparó en un medio líquido de dextrosa sabouraud, transfiriéndose 4 piezas de los cultivos aislados aproximadamente de 1 cm de diámetro, cultivándose por 7 días a 28°C y con agitación de 100 rpm.

2.3 Pretratamiento de sustrato

Se inocularon con 90g de micelio líquido, 100g de hojas de jardinería en vasos de precipitados añadiéndose diferentes cantidades de soluciones minerales, para variar la humedad en 10, 20 y 30 % mostradas en la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Solución mineral de 1 Lb

Reactivo	Cantidad g
Nitrato de sodio	1.9997
Tartrato de sodio y potasio, 4-hidratado	1.0087
Cloruro de potasio	0.5032
Sulfato de magnesio	0.5016
Sal de Mohr	0.0102

Para esta solución se añadieron cantidades de 80 ml, 50ml y 150 ml para la variación de la humedad.

Tabla 2. Solución mineral 100 ml

Reactivo	Cantidad g
Sal de Mohr	0.1055
Sulfato de cobre	0.0156
Sulfato de zinc	0.1614
Sulfato de manganeso	0.0122
Molibdato de amonio	0.0106
Cloruro de cobalto II	83.3 µl

De esta solución las cantidades fueron iguales en todos los inóculos siendo de 1 ml.

La mezcla del inoculo se colocaron en cajas etiquetadas, y se preparó una muestra control sin inoculo. Las muestras se incubaron a 30°C por 40 días. Durante los días las cajas se humedecieron constantemente y se les añadió humo diario.

2.4 Métodos analíticos

Antes del pretratamiento se caracterizaron las hojas de jardín, determinando los azucares reductores con el método DNS (Miller, 1959), azúcares totales usando el método Dubois (Dubois 1956), sólidos totales y volátiles con el Método estándar APHA.(DOF 2015).

Después y antes del pretratamiento se analizó la lignina en base al método de Klason, que consiste en una hidrolisis ácida, se filtra al vacío lo que se tuvo de la hidrolisis, el filtrado se seca y se lleva hasta cenizas, obteniendo así el peso seco para calcular el residuo insoluble en ácido (%AIR) (Ec 1), y porcentaje de cenizas (Ec. 2), para finalmente calcular el porcentaje de lignina (% AIL) (Ec. 3).

ISSN en trámite

$$\%\,AIR = \frac{Peso\ de\ muestra\ seca - peso\ de\ crisol}{Peso\ de\ la\ muestra} * 100 \quad (1)$$

$$\%\,Cenizas = \frac{Peso\ de\ cenizas - peso\ de\ crisol}{Peso\ de\ la\ muestra} * 100 \quad (2)$$

$$\%AIL = \%AIR - \%cenizas \quad (3)$$

Después del filtrado la muestra liquida hidrolizada se neutralizo con carbonato de calcio y se analizaron azucares como glucosa, xilosa, arabinosa y galactosa en HPLC. Calculando las concentraciones de estos azúcares en cada tratamiento y comparando con las hojas trituradas.

Los tratamientos se identifican como muestra la tabla 3.

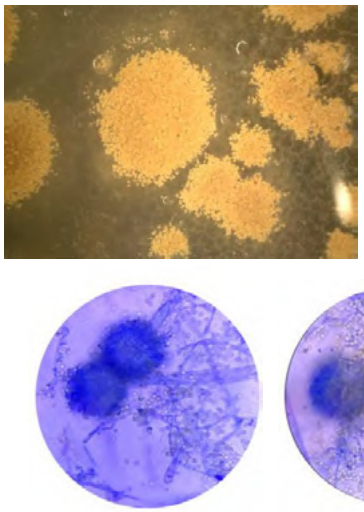
Tabla 3. Simbología de los tratamientos

Condiciones exérimentales	Tratamiento
Hojas de jardín	1, L1
Hongo A 10 %H	2, L2
Hongo A 20% H	3, L3
Hongo A 30 % H	4, L4
Muestra control	5, L5
Hongo B 10% H	6, L6
Hongo B 20% H	7, L7
Hongo B 30% H	8, L8
Hongo C 10% H	9, L9
Hongo C 20% H	10, L10
Hongo C 30 % H	11, L11

2.5 Análisis estadístico

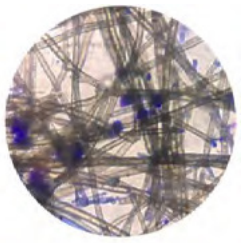
El análisis estadístico se realizó en Minitab mediante análisis de varianza de un solo factor, con la prueba de comparaciones múltiples Fisher y Tukey.

(a)



(b)

(c)



(d)

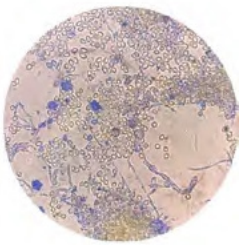


Figura 2. Características morfológicas de Aspergillus. (a) Fotografía de colonias de la cepa A, (b) microfotografía de cepa A que muestra la morfología celular (100x). (c) microfotografía de cepa B que muestra la morfología celular (100x). (d) microfotografía de cepa C que muestra la morfología celular (100x).

3. Resultados y discusión

3.1 Aislamiento e identificación morfológica de las cepas A, B y C.

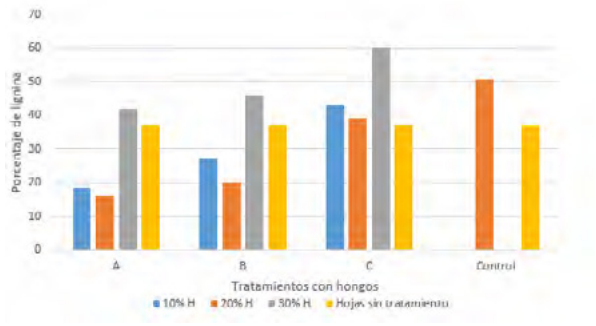
En la figura 2 se observan las morfologías macroscópicas y microscópicas de cada cepa, de acuerdo con estas fotografías se identificaron como aspergillus.

3.2 Biodegradación de la lignina por las cepas.

En la Figura 3 se observa el porcentaje de degradación en cada una de los tratamientos, después de los 40 días de la incubación, Para cada cepa la mayor degradacion de lignina se dio con una humedad del 20%, y el tratamiento que dio mejores resultados fue para el hongo A con un porcentaje de lignina del 16.18%.

ISSN en trámite

(a)



(b)

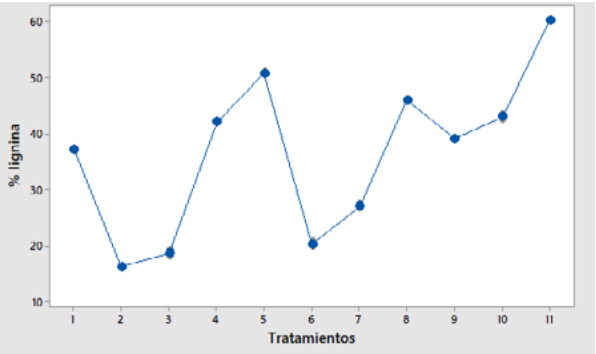


Figura 3. (a) Comparación de % lignina en cada tratamiento (b) Intervalos de % lignina entre los tratamiento.

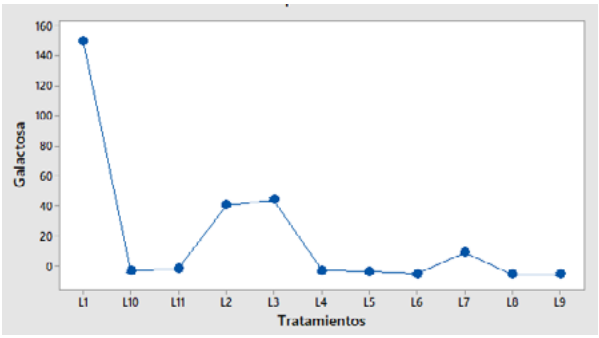
El cambio que hubo en los azúcares se muestra en la figura 4. Los azúcares analizados fueron glucosa, xilosa, galactosa y arabinosa, pero esta última no estuvo presente en ninguna de las muestras analizadas.

En la figura 4 (a) se puede observar que las maximas concentraciones galactosa, se obtuvo en los tratamientos L1 y L2 que fue de 40.36 y 44.102 ppm. Mientras que al inicio del tratamiento se tienen 149.62 ppm de concentración.

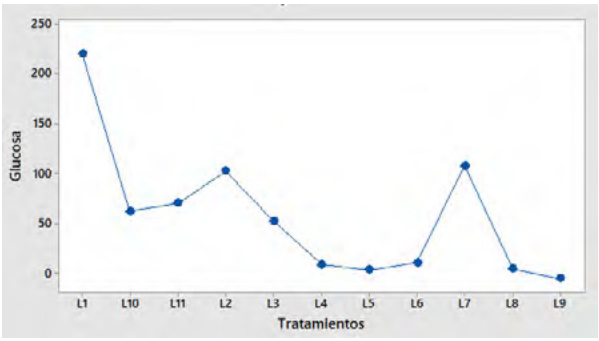
La glucosa representada en la figura 4 (b) muestra mayores concentraciones comparada con los otros graficos. Los tratamientos L2, L7 tienen concentraciones de 103.013 y 108.041 ppm. . Mientras que al inicio del tratamiento se tienen 220.84 ppm de concentración.

La xilosa estuvo presente en las hojas de jardin, y según la figura 4 (c) solo el tratramiento L2 y L3, siendo estos los que consumieron menor cantidad de xilosa, dejando concentraciones de 37.94 y 33.13, mientras que al inicio del tratamiento se tienen 105.81 ppm de concentración.

(a)



(b)



(c)

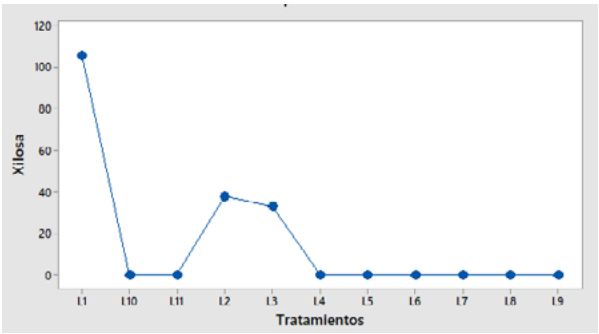


Figura 4. (a) Intervalos de concentracion de galactosa entre los diferentes tratamientos, (b) Intervalos de concentracion de glucosa entre los diferentes tratamientos, (c) Intervalos de concentracion de xilosa entre los diferentes tratamientos.

4. Conclusión

ISSN en trámite

La mejor degradación de lignina se obtiene en los tratamientos con una humedad del 20%, esto se debe a que a estas condiciones hay un buen crecimiento de los hongos, mejorando asi la degradación de la lignina. Un gran crecimiento del hongo no siempre representa un resultado positivo, debido a que la cepa requiere más nutrientes y esta empieza a consumir los azúcares necesarios para que se lleven a cabo otros bioprocesos. En el caso de este estudio el hongo A obtuvo resultados muy positivos, porque las concentraciones de los azúcares no disminuyeron drásticamente como en el caso de los hongos B y C.

En el caso del tratamiento control la concentración de azúcares tuvo una disminución muy grande, debido a que las hojas no fueron esterilazadas, estas cuentan con distintos microorganismos que son la causa de las bajas concentraciones.

Referencias

Bugg, T.D. Ahmad, M. Hardiman E.M. y Rahmanpour, R (2011). Pathways for degradation of lignin in bacteria and fungi, *The Royal Society of Chemistry.* 28 (12) 1883–1896.

Carota, E. Crognale, S. Russo, C. Petruccioli, M. y D'Annibale, A. (2021). Lignocellulolytic potential of the recently described species aspergillus olivimuriae on different solid wastes. *applied sciences.* 11 (5349).

Diario oficial de la federación (DOF), (2015). Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba. (NMX-AA-034-SCFI-2015). nmx-aa-034-scfi-2015.pdf (www.gob.mx)

Dubois M., Gilles K. A., Hamilton J. K., Rebers P.A. y Smith F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28, 350-356.

Feng, S.L. Wang, H. Chen, J.L. Zhu, H. X. Yao, R.S. Wu, H. (2021). Degradation and Transformation of Lignin by a Fungus Aspergillus Flavus Strain F-1. *National Institute of Genetic Engineering and Biotechnology.* 18 (3). 62-69.

Hatakka, A. Hammel, K. E. (2010). Fungal biodegradation of lignocelluloses. M. Hofrichter (Ed.) *Industrial Applications.* 319-340. The Mycota X. Springer-Verlag Berlin.

Ivanova, L.A. FomenkoIvan, A. Churmasova, L.A. y Kuzmicheva, T. P. (2022). Overview of mycelial fungi – lignin destructors, *Knowledge E.* 175–180.

Miller, G. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar.Anal.Chem. 31: 426-428.

Mustafa, A.M. Poulsen, T.G. Xia, Y. y Sheng, K. (2017) Combinations of fungal and milling pretreatments for enhancing rice straw biogas production during solid-state anaerobic digestion, Bioresource Technology. 224 (2017) 174–182.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf

Singh, P., Suman, A., Tiwari, P., Arya, N., Gaur, A., Shrivastava, A.K., (2008). Biological pretreatment of sugarcane trash for its conversion to fermentable sugars. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 24, 667-673.

ISSN en trámite

Convertir las pérdidas agrícolas en productos deshidratados por medio de energía solar

Mónica L. Acosta Miranda*, Leonor Ángeles Hernández **
Julio Pérez Machorro*, Onésimo Nieves Galeana ******

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Cuautla, Yecapixtla, Morelos. 62826 México*
*(Tel: 777-327-1780; e-mail: monica.acosta@cuautla.tecnm.mx, ** leonor.angeles@cuautla.tecnm.mx, *** julio.perez@cuautla.tecnm.mx, ****17680078@cuautla.tecnm.mx).*

Abstract: Este proyecto busca ofrecer a los productores agrícolas del oriente del estado de Morelos, una alternativa para el aprovechamiento del excedente de sus productos, por medio de un deshidratador solar automatizado programable, que capte información del ambiente y realice algunas tareas por sí mismo como desplazarse siguiendo los rayos solares en un movimiento girasol, guardar registros como temperatura, radiación y humedad, implementando para ello, el internet de las cosas (IoT) y garantizando al consumidor un producto de calidad. Al mismo tiempo se libera a la comunidad de desechos contaminantes, se promueve el uso de energías limpias conservando el medio ambiente y convirtiendo las pérdidas, en productos saludables que pueden venderse a un precio razonable, mejorando los ingresos de los productores. Es viable de aplicar en el Estado de Morelos debido a la cantidad de productores agrícolas de la región, su clima cálido, y los altos niveles de radiación solar; elementos clave de la propuesta.

Keywords: Pérdidas en la producción agrícola, deshidratación solar, automatización y programación.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las grandes preocupaciones de los gobiernos y organismos a nivel mundial es la pérdida y desperdicio de alimento (PDA), ya que, a nivel mundial, se pierden o se desperdician aproximadamente un tercio de todos los alimentos producidos (FAO, 2022). Para ello la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha desarrollado estrategias, políticas y mecanismos con apoyo de diversos aliados, tratando de disminuirlas al menos en un 50% como lo señala el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12, Producción y consumo responsable, de la Agenda 2030, que en su meta 12.3 que señala:

"De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha" (FAO, 2022).

Si se considera que el número de personas que sufren hambre a nivel mundial se ha incrementado desde 2014, resultan ilógicas las cifras sobre la pérdida de un 14% en la producción, seguido por el 19.8% en la postcosecha y almacenamiento, a lo que se suma al 17% de los alimentos disponibles para su consumo en mercados y restaurantes y el 60% de desperdicio en los hogares; alimentos que van directamente a la basura ejerciendo un efecto dañino al medio ambiente, agotando los recursos naturales a la vez que se emiten gases de efecto invernadero (ONU, 2021). Un ejemplo de lo anterior se puede observar en la figura 1.



Figura 1. Producto sin cosechar por baja rentabilidad. Una vez seco se levanta y arroja a la basura (Oacalco, Morelos; abril 2022).

Derivado de las alarmantes cifras de PDA surge la necesidad de reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos con la intención de lograr la eficiencia económica y la seguridad alimentaria,

ISSN en trámite

mejorar la nutrición, fomentar la sostenibilidad ambiental y reducir los costos de producción.

La propuesta de deshidratar, por medio de la energía solar, los excedentes de producción derivados de momentos inadecuados para la recolección, estándares estéticos para la exhibición de productos frescos, falta de intención de comprar justa y/o problemas en la comercialización de los productos que no hacen rentable la cosecha, ya que son las frutas y verduras los alimentos que más se pierden y/o desperdician. Pretende sumarse como una solución innovadora con una nueva forma de recolección, conservación y transformación de alimentos, con un valor agregado e integrando los productos deshidratados a la cadena de comercialización, disminuyendo los costos de producción, evitando la contaminación y proporcionando acceso a una alimentación suficiente y nutritiva a quienes no la tienen en estos momentos.

1.1 Deshidratación de alimentos

La deshidratación es uno de los métodos más antiguos de conservación de los alimentos. Consiste en eliminar la mayor cantidad de agua posible de los productos, mediante calor suave, conservando su valor nutricional y manteniendo su sabor. Se considera un producto deshidratado aquel que contiene menos del 2,5% de agua (Diario Vasco, 2021).

Es posible deshidratar frutas, verduras, hortalizas, carnes o pescados, entre otros alimentos, como un mecanismo de conservación. Entre los beneficios de la deshidratación de alimentos encontramos (Unilever, 2022):

- Prolonga su vida útil, manteniendo sus nutrientes
- Facilita su almacenaje, transporte y manipulación al reducir el espacio
- Concentra e intensifica los sabores.
- Impide la proliferación de bacterias y mohos
- Es posible volver a hidratarlos conservando su sabor
- Permite consumirlos en cualquier época del año
- Al deshidratarse en su momento de madurez, asegura la mejor calidad de los alimentos.
- Permite conservar excedentes de cosechas o utilizar las frutas o verduras antes de que se echen a perder.

Existen diversos métodos para deshidratar los productos: 1) Secado tradicional al sol, 2) Secado en el horno y 3) Secado con deshidratadores de alimentos, que pueden ser solares o eléctricos (Ideas para cocinar, 2021).

1.2 Deshidratadores solares

Los deshidratadores solares son equipos de ecotecnología utilizados para la preservación de alimentos por medio del secado mediante el calor que genera la radiación solar. Permite conservar los alimentos por más tiempo, de manera saludable, ecológica y sustentable ya que los alimentos se conservan usando la energía solar y el viento. Por lo general, los deshidratadores solares son baratos y eficientes (Tezontle, 2021).

Regularmente, los deshidratadores solares constan de dos elementos básicos: 1) el colector solar cuya función es captar la radiación solar y convertirla en forma de calor y así transferirla por procesos de convección a fluidos como el aire que circula por el sistema de forma natural o forzada, 2) la cámara o torre de secado, constituida por un compartimento que permite la ejecución de procesos de transferencia de masa y calor para la obtención de alimentos deshidratados. Su función es el secado de los alimentos y se lleva a cabo por circulación del aire caliente proveniente del colector solar, a través de las bandejas que contienen los productos a secar (Ivars, Mora, & Manavella, 2017).

Desafortunadamente, la deshidratación con fuentes renovables es un área poco aprovechada en México, debido a que las grandes industrias no se han interesado este tipo de tecnología que presenta oportunidades de autoempleo y generación de ingresos (De los Santos, Lugo, & Sueños, 2020).

1.3 Energía solar

"La energía solar es un recurso renovable obtenido mediante la radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta) que proviene del Sol" (OISE, 2022). México cuenta con un alto potencial solar, en promedio de entre 5 y 6 kWh/m^{2}día.

En lo que respecta al estado de Morelos, los índices de radiación solar son considerables (de 4.7 a 5.8 kWh/m^{2}día), lo que ofrece grandes posibilidades de uso para esta fuente de energía alternativa. De acuerdo con el Instituto de Geofísica (IGf) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelos, junto con los estados de Puebla y Oaxaca son excelentes para la explotación del recurso solar a lo largo del año (Valdes, 2022)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El propósito de este trabajo es aprovechar lo que actualmente se considera pérdida de la producción agrícola y generar productos deshidratados por medio de la energía solar. Para el desarrollo del prototipo se contemplaron las siguientes etapas:

1. Investigación documental con la finalidad de conocer el estado del arte y dar forma al cuerpo de ideas sobre los deshidratadores solares y el proceso de deshidratación.

ISSN en trámite

2. Entrevistas con productores agrícolas de la región oriente del estado de Morelos para conocer su problemática y plantear la propuesta.
3. Diseño, con los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica se logró definir el mejor diseño para el cuerpo principal del prototipo y su automatización.
4. Construcción y armado de la estructura del deshidratador, diseño de los circuitos electrónicos, medición de valores, calibración y conexión de las distintas tarjetas electrónicas con el panel solar, la batería y el motor.
5. Pruebas de funcionamiento del prototipo implementando loT, análisis de los resultados obtenidos y calibración de la parte mecánica, modelado matemático del efecto térmico que se produce en la estructura, así como el diseño básico de la aplicación móvil.
6. De manera conjunta se trabaja en el plan de negocios.

3. RESULTADOS

El estado de Morelos tuvo una superficie agrícola sembrada de 137,165 hectáreas y134,069 hectáreas cosechadas (Axayacatl, 2021). Entre los principales productos derivados del campo encontramos jitomate, nopal, higo, calabaza, caña de azúcar, arroz.

En 2017, Morelos ocupó el sexto lugar nacional en cuando a rentabilidad de valor generado por hectárea, por arriba de estados como Sinaloa, Jalisco, Estado de México y Veracruz. Los municipios con mayor producción agrícola en Morelos son: Ayala, Cuautla, Yecapixtla, Atlatlahucan, Axochiapan, Jonacatepec, Zacatepec, Jojutla, Tlaltizapán y Tlaquiltenango (El Sol de Cuernavaca, 2018). Con esta información se entrevistó a productores agrícolas de jitomate en los municipios de Jonacatepec y Atlatlahucan quienes mostraron interés en el prototipo ya que enfrentan la problemática planteada sobre la pérdida de alimentos.

El primer prototipo de deshidratador solar automatizado es de tipo colector y armario, realizado en madera y se diseñó en el programa SolidWorks para modelado mecánico en 2D y 3D. Consta de un colector solar en el cual el aire se calienta y asciende hasta el armario donde se colocan los productos a deshidratar. Está compuesto por tres partes separadas para su fácil traslado: 1) Caja de secado, 2) Rampa o cama térmica y 3) Soporte inferior; como se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2. Primer prototipo de deshidratador solar

Cuenta con un sistema para el control del motor y el control automático se lleva a cabo, actualmente, mediante una tarjeta de adquisición de datos Arduino que controla dos motorreductores. La cama térmica aloja los paneles solares posicionados en un ángulo perpendicular a los rayos del sol. Se emplearon motorreductores de tipo cónico-espiral, para generar la fuerza necesaria para el giro del mecanismo por medio de su eje motor que le da movilidad. El dispositivo, para detectar los rayos solares, cuenta con 10 aberturas para las fotorresistencias colocadas en la parte superior de forma cónica. Si bien el modelo sigue la estructura tradicional de los deshidratadores solares presenta la ventaja de girar siguiendo los rayos solares por medio de los controles automáticos con los que cuenta.

Actualmente se trabaja en una versión en acero inoxidable de grado alimenticio T-304 con el objetivo de prevenir cualquier tipo de contaminación en los alimentos. La estructura del deshidratador solar presenta un ángulo de inclinación de 30° lo que provocará que la cámara térmica capte mayor radiación solar y genere más calor en su interior, aumentando la velocidad de secado de los alimentos. Las medidas de la cámara térmica son las adecuadas para un deshidratador solar indirecto. La figura 3 muestra las medidas laterales del deshidratador solar. La estructura del deshidratador solar cuenta con una capa de material aislante con el objetivo de conservar la mayor cantidad de calor posible.

ISSN en trámite

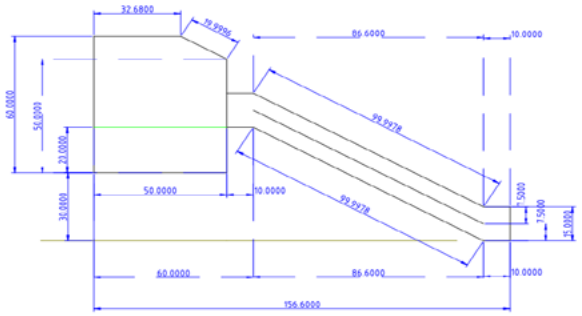


Figura 3. Medidas laterales del deshidratador

Para el diseño de los circuitos electrónicos se tomaron las siguientes consideraciones respecto a los componentes:

- Tarjeta de control. Microcontrolador PIC18F2550 que posee características que lo hacen el más adecuado para el desarrollo de tarjetas de control a utilizar para aplicaciones del Internet de las Cosas. El circuito de control consta de un PIC18F2550 en conjunto con un L293D para controlar el giro de los motores que hacen rotar al deshidratador solar. El circuito de control cuenta con conexiones a un módulo bluetooth, al sensor de luz y a los sensores de temperatura y humedad DHT22 y el circuito integrado L293D cuenta con diodos de protección para evitar corrientes inversas producidas por los motores.

- Sensor de luz. Considerando las características de la tarjeta de control, se requieren los siguientes parámetros para el diseño del sensor de luz: la corriente que entre a través de cada una de las entradas analógicas debe ser menor a 50 mA para no dañar el PIC y el voltaje que entre a cada una de las entradas analógicas del microcontrolador PIC18F2550 debe ser menor a 5V para no dañar el componente mencionado. Para ello se utilizó una configuración de 8 divisores de voltajes hechas a partir de un resistor de 10kΩ y un fotorresistor de 2MΩ.

- Para diseñar la tarjeta de potencia que controla los motores se tomó en cuenta lo siguiente: Los motores deben ser alimentados a 12V DC para que puedan funcionar correctamente, la tarjeta de potencia es controlada a través de la tarjeta de control, los motores generan una corriente inversa, por lo que se deben agregar dispositivos de protección (diodos rectificadores) a la tarjeta de potencia. Por lo anterior se usó un transistor BJT 2N2222A, el diodo 1N4004 para proteger el circuito de control, un relevador SRD-05VDC-SL-C y dos resistencias.

- La alimentación de los circuitos electrónicos anteriores se realizará por medio de una tarjeta de alimentación específica, buscando aumentar la vida útil de cada componente.

- PCB del circuito de control y sensor de luz. Para reducir el espacio ocupado por los circuitos electrónicos desarrollados se decidió incluir las resistencias del sensor de luz en la tarjeta de control.

- El diseño de PCB del circuito de potencia fue realizado con el software PCB Widzard para posteriormente transferirlo a una placa fenólica de 5cm X 7cm. Se removió el cobre y se soldaron los componentes en su respectivo lugar de la placa como puede observarse en la figura 4.



Figura 4. Circuito de potencia

El deshidratador cuenta con un circuito electrónico para la tarjeta de control utilizando microcontroladores y conexiones a un módulo bluetooth, al sensor de luz, a los sensores de temperatura y humedad y al circuito integrado con diodos de protección para evitar corrientes inversas producidas por los motores. La temperatura y humedad se controlan mediante 3 sensores DHT22 colocados en el colector solar, en la cámara térmica y sobre la cara superior de la cámara térmica.

La capacidad del deshidratador es de aproximadamente 3 kilos de producto en rebanadas de 5 mm y con espacio suficiente entre ellas. Se han realizado pruebas con jitomate y manzana que se deshidrataron en 10 y 5 horas de exposición respectivamente, a una temperatura ambiente promedio de 29º centígrados. La principal razón de la diferencia en el tiempo de deshidratación es el porcentaje de humedad de cada uno de los productos ya que el jitomate cuenta con un 95% de humedad (Vazquez, 2019) y, en el caso de la manzana, es del 84.4% (Ocaña, 2019).

La variación de las temperaturas en la deshidratción del jitomate se registró por medio de la tarjeta de adquisición de datos que recaba información de los sensores. En la Tabla 1 se presenta el registro de las temperaturas, en un periodo de cuatro horas, de las 12 a las 16, en el colector solar, la cámara termica y la temperatura ambiente se puede apreciar que la temperatura en el colector solar es mucho mayor.

Tabla 1. Comparación de temperaturas.

	Temperatura mínima(°C)	Temperatura promedio(°C)	Temperatura máxima(°C)
Colector Solar	43.8	54.6	64.4
Ambiente	27.1	29.23	30.8
Cámara Térmica	34.7	38.5	41.2

ISSN en trámite

De manera gráfica la comparación de temperaturas se encuentra en la figura 5.

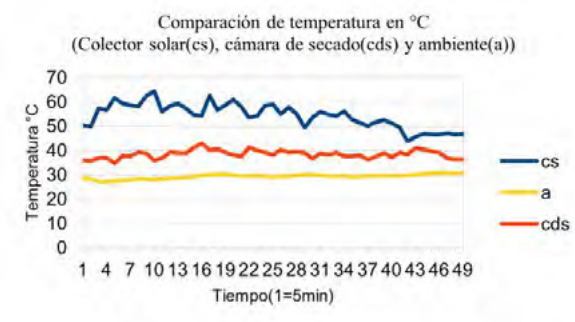


Figura 5. Comparación de temperaturas

Respecto a la humedad, el comportamiento es diferente. La humedad del ambiente y en el colector solar es mayor a la humedad de la cámara térmica, como se aprecia en la Figura 6. Esto indica que el proceso de deshidratación sigue en proceso, ya que 4 horas no son suficientes para deshidratar las rebanadas de jitomate colocadas en las charolas.

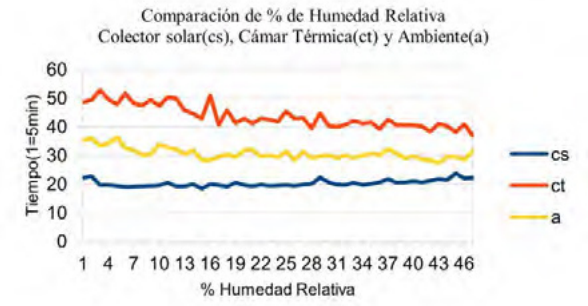


Figura 6. Comparación de humedad relativa

Los datos correspondientes a la gráfica sobre la humedad de cada una de las partes que componen el deshidratador y la humedad ambiente son los mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Humedad relativa en cada área.

Lugar	% Humedad Relativa mínima	% Humedad Relativa promedio	% Humedad Relativa máxima
Colector Solar	19.1	20.28	23.7
Cámara de secado	37.1	43.75	52.8
Ambiente	27.4	30.72	36.3

Después de las mencionadas 4 horas, el producto deshidratado en esta prueba se muestra en la Figura 7 y, como se alcanza a notar, el proceso aún no está concluido.



Figura 7. Producto deshidratado

Se pretende continuar con las pruebas de funcionamiento con diversos productos de la región como higo y calabaza y, en caso necesario, efectuar los ajustes respectivos. Se tiene considerado someter a pruebas nutrimentales los productos obtenidos, así como realizar las pruebas de empaque para su comercialización. De igual manera se está trabajando en la aplicación que controlará el deshidratador por medio del telefono celular para la nueva versión del prototipo.

Otro aspecto importante es la protección del diseño por medio del registro de la patente o modelo de utilidad, al encontrarse, la primera versión, en el nivel TRL 8: “Sistema final completo y evaluado a través de pruebas y demostraciones” del nivel de maduración para la propiedad intelectual, se establece en éste que la tecnología ha sido probada en su forma final y bajo condiciones supuestas. En muchos casos significa el final del desarrollo del sistema

4. CONCLUSIONES

Las dos versiones del deshidratador son fácilmente adaptables, en cuanto a dimensiones y componentes, a los requerimientos de cada productor o para uso doméstico. Solucionan la problemática del manejo de los excedentes de producción agrícola convirtiendo en ingresos las pérdidas de los agricultores.

La propuesta busca atender la contradictoria problemática del hambre por un lado y la perdida y desperdicio de alimentos por otro. Aún y cuando existen diversas propuestas para atender el desperdicio de alimentos, como la labor que realizan los bancos de alimentos, poco se ha hecho respecto a la pérdida de las cosechas, problemática que podemos encontrar en diversas partes de nuestro país.

Con el prototipo desarrollado se pretende ofrecer una alternativa a los productores agrícolas para que no dejen perder los productos, buscar que los recolecten, deshidraten y, de esa

ISSN en trámite

manera, los ofrezcan a sus comunidades a un precio justo que les permita recuperar sus costos de producción, al mismo tiempo que proporcionan alimentos nutritivos a la población.

Como se mencionó desde el inicio se busca que el proyecto impacte en lo social, económico y ambiental en los productores agrícolas y en las comunidades de la región oriente del Estado de Morelos. Ayudar a los agricultores a producir cultivos de alto rendimiento y alta calidad, de manera sostenible, aprovechando la tecnología.

De igual forma, el proyecto abona en el fortalecimiento de la labor académica, contribuyendo a la generación del conocimiento a través del desarrollo de productos, diseños, procesos y servicios que mejoran la calidad de vida de la sociedad; generando aportes sociales y económicos significativos a la agricultura, el medio ambiente, la electrónica y mecatrónica propiciando la vinculación con los sectores público, social y privado con el objetivo de contribuir al desarrollo social y sostenible así como al crecimiento económico de las regiones y, en general, del país (TecNM, s/f).

En este proyecto se contemplan temas como el cuidado del medio ambiente, la biodiversidad y el entorno sostenible promoviendo aportaciones que contribuyan al manejo de desechos mediante la prevención, reducción, reciclaje y reutilización, así como la utilización de energías renovables. Favorece el trabajo multidisciplinario de docentes y estudiantes en actividades de investigación, desarrollando nuevas habilidades y competencias.

5.2 Referencias

Axayacatl, O. (2021). *Estadísticas de producción agrícola del estado de Morelos*. Obtenido de https://blogagricultura.com/estadisticas-agricolas-estado-morelos/

Diario Vasco. (2021). *Ventajas de la deshidratación de alimentos* . Recuperado el 12 de septiembre de 2021, de https://www.diariovasco.com/gastronomia/despensa/beneficios-deshidratar-frutas-20210514101303-nt.html

El Sol de Cuernavaca. (2018). *Logra Morelos cifra histórica en producción agrícola*. Obtenido de ttps://www.elsoldecuernavaca.com.mx/local/logra-morelos-cifra-historica-en-produccion-agricola-1858820.html

FAO. (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/1231/es/

FAO. (2022). *Reducción, medición y políticas de las pérdidas y desperdicio de alimentos*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura: https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/es/

Ideas para cocinar. (2021). *Cómo deshidratar alimentos*. Recuperado el 2022, de https://ideasparacocinar.com/trucos-cocina/deshidratar-alimentos/

Ocaña, C. (marzo de 2019). *Determinación de Humedad en la Manzana*. Obtenido de Instituto de Estudios Superiores de Chiapas en Tuxtla Gutiérrez, S. C.: https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-salazar/bromatologia/determinacion-de-humedad-en-la-manzana/4151951

OISE. (2022). *Energía Solar*. Obtenido de https://www.oise.mx/solar

ONU. (29 de septiembre de 2021). *Día Internacional de Concienciación sobre la Pérdida y el Desperdicio de Alimentos*. Obtenido de Un reciente Día Internacional con un difícil punto de partida: https://www.un.org/es/observances/end-food-waste-day/background

TecNM. (s/f). *Programa de Desarrollo Institucional PDI 2019-2024.* CDMX: Tecnológico Nacional de México.

Tzenzontle. (2021). *¿Qué es un deshidratador Solar de Alimentos?* Recuperado el 12 de septiembre de 2021, de ttps://www.tzenzontle.com.mx/post/qué-es-un-deshidratador-solar-de-alimentos

Unilever. (2022). *El proceso de deshidratación y sus beneficios*. Recuperado el 15 de febrero de 2022, de https://www.unileverfoodsolutions.com.ar/inspiracion-para-chefs/gestion-del-negocio-gastronomico/el-proceso-de-deshidratacion-y-sus-beneficios.html

Valdes, M. (14 de enero de 2022). La UNAM genera datos para aprovechar la energía solar en México. *Boletín UNAM, 030*(030). Obtenido de https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2022_030.html

Vazquez, J. (18 de noviembre de 2019). *Jitomate: características, hábitat, cultivo, propiedades*. Obtenido de Lifeder: https://www.lifeder.com/jitomate/


@TecNMCenidet.mx


Cenidet


Cenidet_oficial


CENIDET


https://cenidet.tecnm.mx/

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico