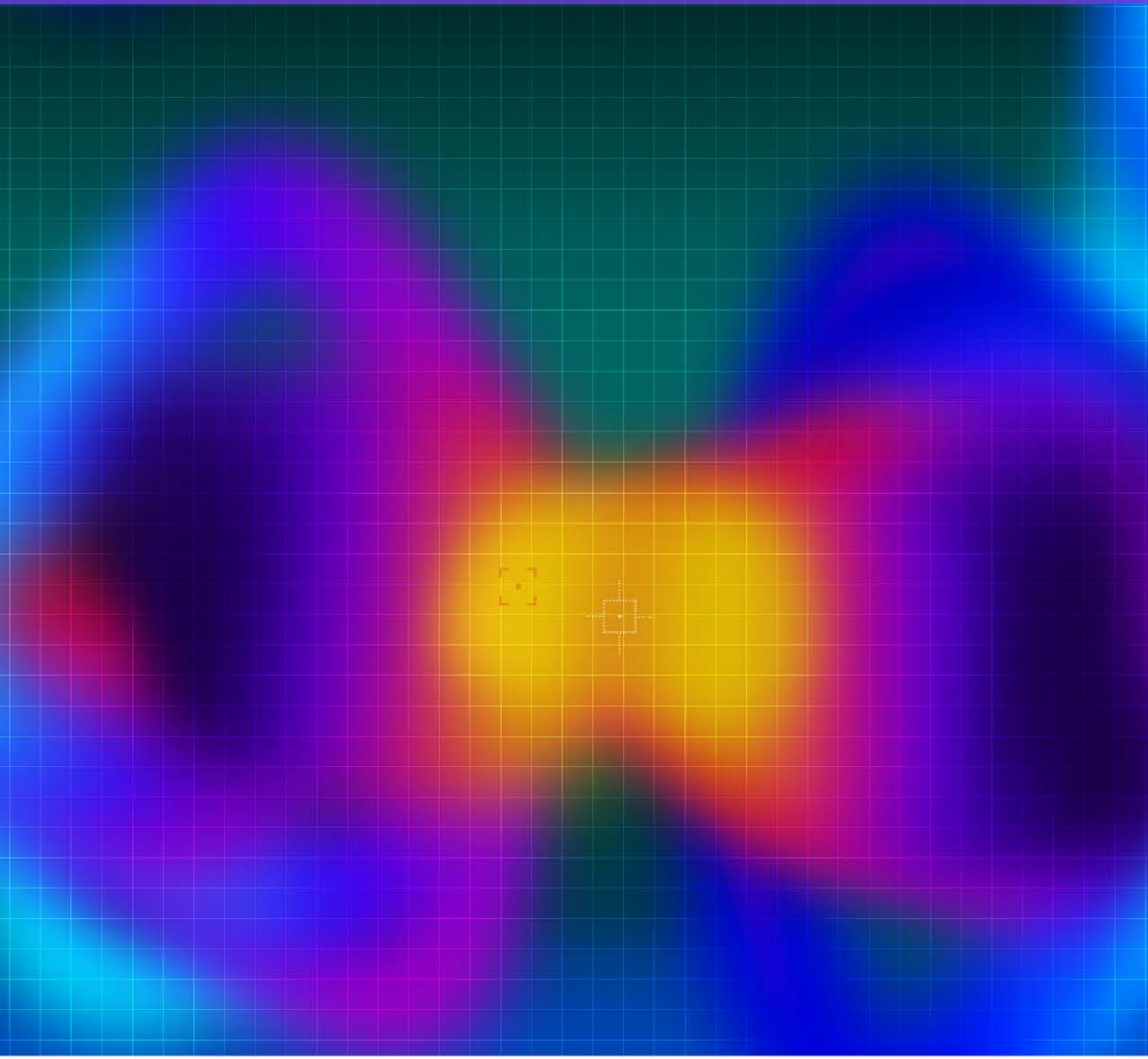
TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Julio - Diciembre 2023 Vol. 6 / Núm. 2 ISSN: 2992-8338



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®
cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Volumen 6, Núm. 2, Julio-Diciembre 2023

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

VOLUMEN 6, NÚM. 2 JULIO-DICIEMBRE 2023 **ISSN: 2992-8338**

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

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA, Volumen 6. Núm.2 julio-diciembre 2023, es una publicación semestral editada por el Tecnológico Nacional de México, Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, teléfono 5536002511 Ext. 65092, correo d_vinculacion05@tecnm.mx, a través del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México, Contacto: + (52) 777 3627770, vin_cenidet@tecnm.mx, www.cenidet.tecnm.mx. Editor Responsable: M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: No. 04-2023-072614555600-102, ISSN: 2992-8338, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, profesora-investigadora del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, Interior Internado Palmira s/n, Colonia Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. Fecha de última modificación, 31 de enero de 2024.

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

Directorio

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

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

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

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

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Jefa del Departamento de Desarrollo Académico

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

Dr. Jarniel García Morales
Jefa del Departamento de Ingeniería Electrónica

Dr. Rafael Campos Amezcua
Jefe del Departamento de Ingeniería Mecánica

Portada: Imagen recabada y tratada de la Figura 2 del artículo Análisis Termográfico y Fractográfico del efecto de los tratamientos térmicos.

Editorial

En 2018 el Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), creó con el nombre de Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, su primera revista académica como una iniciativa de impulsar la capacidad y voluntad de la comunidad científica de compartir los trabajos de estudiantes de posgrado principalmente del Centro. Como todo proyecto que crece y se va posicionando, se empezaron a recibir trabajos de otros estados del país en México y de otros países. Estos artículos provienen de una actividad semestral que impulsa el CENIDET a través de una Convocatoria abierta en donde además de escribir el artículo, se presenta de manera presencial o virtual.

A partir del Volumen 6, Número 2 Julio-Diciembre 2023 la Revista Académica migró del nombre de Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada al de Tecnología y Ciencia Aplicada del TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico TecNM/CENIDET y, a partir de este número los artículos son obtenidos del Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA) antes Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada.

Para el CENIDET es de vital importancia que los desarrollos tecnológicos y la investigación científica tengan un impacto social, por ello los artículos de este número además de contener temas relacionados a las áreas de experiencia de los Posgrados del Centro: Ciencias de la Computación, Ciencias de la Ingeniería, Ingeniería Mecánica, Ingeniería en Mecatrónica, Ingeniería en Electrónica y Semiconductores, atienden ejes transversales de alguna de las 8 áreas prioritarias: Economía Social y Solidaria, Desarrollo Urbano-Industrial, Sistemas Socioambientales, Soberanía Alimentaria, Soberanía Energética, Soberanía en Salud, Tren Maya y Plan Sonora.

Este número contiene una riqueza en cada artículo expuesto. En cada volumen de la revista Tecnología y Ciencia Aplicada del TecNM/CENIDET se busca fortalecer la innovación.

La revista Tecnología y Ciencia Aplicada del CENIDET es una valiosa herramienta para dar a conocer los avances en el campo de la ciencia y la tecnología, conformando alianzas estratégicas que impulsen el trabajo multidisciplinario.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora
Revista Académica
Tecnología y Ciencia Aplicada

COMITÉ DE ARBITRAJE INTERNO Y EXTERNO

Comité de Arbitraje TecNM / Cenidet

Dr. Abraham Claudio Sánchez
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Carlos Aguilar Castillo
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dr. Carlos Manuel Lara Barrios
Dr. Efraín Simá Moo
Dr. Enrique Quintero Mármol Márquez
Dr. Érik Rosado Tamariz
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Jarniel García Morales
Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Dr. Jorge Colín Ocampo
Dr. José Hugo Arellano Pérez
Dr. José Jassón Flores Prieto
Dr. Manuel Adam Medina
Dra. Marisol Cervantes Bobadilla
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Dr. Rafael Campos Amezcua
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Roger Alejandro Cundapí Arroyo
Dr. Vitervo López Caballero
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Dra. Jonathan Villanueva Tavira
Dra. Ma. Guadalupe López López
Dra. Sara Lilia Moya Acosta

Comité de Arbitraje Externo

Dr. Alberto Armando Álvarez Gallegos
Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias Aplicadas (CIICAP/UAEM)

Dr. José Martínez Trinidad
Instituto Politécnico Nacional

Dra. Nohra Violeta Gallardo Rivas
Instituto Tecnologico de Ciudad Madero

Dra.Adriana Mexicano Santoyo
Instituto Tecnológico de Cd. Victoria

Dra. Silvia del C. Ruiz Acosta
TecNM / Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca

Dr. Cornelio Morales Morales
TecNM / Instituto Tecnológico de San Juan del Rio

Dr. Sócrates Espinoza Salgado
TecNM / Instituto Tecnológico de Zacatepec

M.T.I Tomás Emmanuel Higareda Pliego
TecNM / Instituto Tecnológico de Zacatepec

Dr. Michael Schilling-Praetzel
Senior Experten Service, Alemania

Dra. Adriana del Carmen Téllez Anguiano
TecNM / Instituto Tecnológico de Morelia

M.I.A Mónica Leticia Acosta Miranda
TecNM / Instituto Tecnológico Cuautla

Dr. Jorge Bedolla Hernández
TecNM / Instituto Tecnológico de Apizaco

Dr. Oscar Jaime Ramos Negrón
TecNM/ Instituto Tecnológico Superior de las Choapas

Dr. Daniel Enrique Constantino Recillas
TecNM / Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

Dra.Armida González Lorence
TecNM / Instituto Tecnológico de San Juan del Rio

Dra. Adriana Herlinda Vilchis González
Universidad Autonoma del Estado de Mexico (UAEMex)

Dr. Enrique Alcudia Zacarías
Universidad Autónoma de Baja California

COMITÉ DE ARBITRAJE INTERNO Y EXTERNO

Comité de Arbitraje TecNM / Cenidet

M.C. Agustín Barrera Sánchez
M.C. Angel Rodrigo Guadarrama Estrada
M.C. Ariel Francisco Hernández
M.C. Israel Isaac Zetina Rios
M.C. Kevin Edson Petatán Bahena
M.C. Kevin Ricardo Miranda Acatitlan
M.C. Marlem Flores Montiel
M.C. Óscar Fernando Oliveros Riego
M.C. Samanta López Salazar
M.C. Víctor Iván Rodríguez Reyes
ING. Héctor Martín Cortés Campos
ING. Irving Abdiel Maldonado Bravo
ING. Luis Felipe Avalos Ruiz
ING. Vicente Borja Jaimes
ING .Yesenia Santana Cardoso

Comité de Arbitraje Externo

M.C. Juan Antonio Paz González
Universidad Autónoma de Baja California

Dr. Quirino Estrada Barbosa
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dr. Pedro Cruz Alcántar
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Dr. Francisco Beltrán Carbajal
Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. Felipe de Jesús Torres del Carmen
Universidad de Guanajuato

Dr. Javier Uriarte Flores
Universidad de Sonora

Dr. Manuel Arias Montiel
Universidad Tecnológica de la Mixteca

Dra. Jorge Salvador Valdez Martínez
Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del estado de Morelos

Dr. Rosendo Vargas Valle
Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del estado de Morelos

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Consejo Editorial de la Publicación Tecnologia y Ciencia Aplicada

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Coeditor

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

Ing. Víctor Josué Ruiz Martínez
Sitio Web

Daniela Abigail Martínez Gama
Diseño de Portada

Daniela Abigail Martínez Gama
M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Diseño Editorial

Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA) 2023
15-17 de noviembre de 2023

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Coordinador general del (CITCA)
noviembre 2023

Comité Editorial de la Publicación julio – diciembre 2023

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Dr. Jonathan Villanueva Tavira
Editores Generales de los Artículos

Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Rafael Campos Amezcua
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Editores Asociados de los Artículos

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ÍNDICE

DESARROLLO URBANO - INDUSTRIAL

- Nanocelulosa como reforzante de compósitos de grafito/poli vinil pirrolidona. 13
- Detection of urbanization levels for categorization of geographic zones in mexico using convolutional neural networks. 16
- Evaluación del mezclado en un modelo físico de un distribuidor de colada continua empleando análisis de imágenes. 21
- Sistema inteligente de detección de armas utilizando visión artificial. 26
- Análisis y selección de ala para aeronave no tripulada. 32
- Aplicación de Redes Neuronales para la Selección y Diseño de Perfil Aerodinámico para Aeronaves de Aviación General. 37
- Valorización de residuos sólidos urbanos en el Estado de Morelos. 41
- Land Cover Image Classification. 48
- Propuesta de un inventario de infraestructura para la estimación del riesgo sísmico en una zona urbana. 54
- Intensificación de Procesos en las Tecnologías Avanzadas de Destilación. 58
- Diseño y desarrollo de prototipo de soldador de punto semiautomático. 64
- Diseño de control robusto líder-seguidor basado en observadores para sistemas multi-agente bajo perturbaciones externas con aplicación en vehículos aéreos no tripulados (UAV's). 70

ECONOMÍA SOCIAL SOLIDARIA

- Flexibilización del horario del docente para participar en nodos de la economía social y solidaria. 77
- Revisión del estado del arte de la integración de minería de datos y modelado de procesos de negocio. 83
- Sistemas tutores inteligentes; breve revisión de la literatura. 89

PLAN SONORA

- Incremento de la permitividad dieléctrica del óxido de cobalto en películas delgadas nanoparticuladas. 96
- Fabricación de inversores lógicos con transistores de película delgada. 101
- Sistema electrónico para medición de ruido electroquímico en baterías de iones de litio. 105
- Modelos de Circuito Equivalente Para Baterías de Litio: Una Perspectiva para el Cálculo de Impedancia. 110

SISTEMAS SOCIOAMBIENTALES Y SUSTENTABILIDAD

- Estimación de biomasa utilizando índices espectrales derivados de imágenes satelitales sentinel-2B. 117
- Sistema Embebido y Aplicación Móvil para el Monitoreo del Nivel y la Calidad del Agua en Unidades Habitacionales. 122
- Calor solar para secado de barro. 127
- Clasificación de especies de anuros con base en señales bioacústicas utilizando la transformada de Fourier fraccionaria. 133
- Síntesis y caracterización de Nps CeO2 para su uso como fotocatalizador en el proceso de degradación de contaminantes por plasma. 139
- Propuesta de un Modelo de Regresión Logística para la clasificación de Residuos Sólidos Urbanos con procesamiento de imágenes. 144
- Programa de educación ambiental campesina para la transición agroecológica. 147
- Microplastics, Macro Problem: A Contemporary Brief Review of Microplastic Pollution and Its Possible Long-term Consequences. 151
- Estudio de una Imidazolina Derivada de Aceite de Pulidura de Arroz como Inhibidor de Corrosión de Bronce SAE 62 en Contacto con un Medio de Lluvia Ácida. 157
- Estudio numérico de la efectividad de captación de aire en una torre de viento con extensiones de entrada. 163

- Sistema de monitoreo ambiental entre dos nodos de sensores con enlace de 9km. 168
- Propuesta de un captador de agua pluvial en naves industriales. 174
- Estudio experimental del efecto de una fachada verde sobre la temperatura interior de un módulo experimental bajo condiciones de clima Cwa. 178

SOBERANÍA ALIMENTARIA

- Optimización de la Producción de Setas a través de Automatización en Amealco de Bonfil: Un Enfoque Sostenible. 185
- Pruebas experimentales para el descascarado de la nuez pecana mediante un prototipo neumático. 191
- Propuesta: Sistema de Análisis en Tiempo Real para Cultivos de Vid. 196
- Aplicación de ciencia de datos para la predicción de producción de Tilapia (Oreochromis niloticus). 201
- Análisis de la viabilidad financiera de un fermentador electrodoméstico. 208
- Desarrollo orientado por modelos de un Sistema de Información Web y Móvil para la gestión de procesos agrícolas en comunidades rurales. 215
- Ventajas y dificultades en la implementación de sistemas hidropónicos. 221
- Diseño de una planta piloto para la obtención de biofertilizantes. 225
- Situación Actual de la Agroindustria de la Uva en el Estado de Querétaro. 231

SOBERANÍA EN SALUD

- Diseño de un brazo robótico de 5 GDL para Silla de Ruedas. 235
- Sistema de monitoreo y registro de operación en equipos médicos (monitor de signos vitales). 241

- Modelos Matemáticos del Sistema Glucosa-Insulina Orientados al Control para Páncreas Artificial. 247
- Andamios electrohilados PHB-PEG tratados con plasma para mejorar la liberación controlada de gentamicina en infecciones cutáneas. 253
- Función de saturación con enfoque fraccionario para la mejora de la calidad en imágenes biomédicas. 259
- Functional Observer for an H2AT System under the Takagi - Sugeno Representation. 265
- Mejora de la calidad de imágenes digitales utilizando el gradiente Gaussiano. 271
- Situación actual de los algoritmos de visión artificial aplicado al diagnóstico de los síntomas del pie diabético. 277
- Sistema de adquisición de señales electromiográficas. 281
- Attack detection scheme for a glucose-insulin system. 286
- Órtesis Robótica para rehabilitación de mano. 292

SOBERANÍA ENERGÉTICA

- Aerogeneradores sin aspas, una alternativa para la generación de energía eólica. 297
- Diseño y evaluación de una red de piezoeléctricos para cosecha de energía en un aerogenerador sin palas. 301
- Diseño y análisis de geometría para generador eólico eléctrico sin palas dentro de calle de remolinos de von karman. 307
- Estudio aeroelástico de un aerogenerador de baja potencia. 312
- Pretratamientos de Bagazo de Caña de azúcar para generación de Bioetanol de Segunda Generación. 318
- Sistemas de cosecha de energía hidráulica con microturbinas hidrocinéticas, una alternativa de generación de energía para electrificación de casas rurales. 324

- An Overview of fault diagnosis and reconfiguration in multilevel converters. 330
- El impacto de las variaciones de la temperatura del medio ambiente en un sistema de enfriamiento de un fotobiorreactor y su relación con el consumo eléctrico. 336
- Modelling the kinetics of transesterification reaction of vegetable oils: Simulating biodiesel production. 342
- Técnicas de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) en Sistemas de Energía Renovable para Electrificación de Zonas Rurales a Partir de Turbinas Hidrocinéticas. 347
- Consumo eléctrico y producción de biomasa microalgal en un fotobiorreactor a escala piloto cultivando Nannochloropsis Oculata. 353
- Control de formación basado en consenso bajo degradación de la batería para sistemas multiagente. 359
- Transferencia de calor en un tubo absorbedor con condiciones de frontera no lineales: Una solución semi analítica. 365
- Estudio de la Generación Anual de Energía de un Panel Fotovoltaico en un Clima Cálido-Subhúmedo. 371
- Parques Agrivoltaicos una Alternativa de Transición Energética Aplicado a la Agricultura. 377

TREN MAYA

- Thermographic and fractographic analysis of the effect of thermal treatments on aluminum 6061-T6 alloy on its fatigue life. 381
- Diseño y Construcción de un Inersor con Fluido Reológico. 387
- Estudio del Daño Superficial de Componentes de Turbinas Retirados de Servicio por Mantenimiento Preventivo. 393
- Análisis de redes mecánicas como dispositivos tipo TID para la reducción de vibraciones generadas por desbalance en sistemas rotodinámicos. 399
- Análisis numérico del chasis de un vehículo de carreras fórmula estudiantil. 405
- Review: la entropía en materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras. 411

DESARROLLO URBANO - INDUSTRIAL

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Nanocelullose as reinforcer in composites of graphite/poly (vinyl pyrrolidone)

Carlos F. Castro-Guerrero[*], Francisco Reséndez-González[**], Ana B. Morales-Cepeda[**], José L. Rivera-Armenta[**]

[*] *CONAHCyT-Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Madero. Ave. 1 de mayo s/n, Col. Los Mangos, Ciudad Madero, Tam., Mexico. C. P. 89440.*

[**] *Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Madero. Ave. 1 de mayo s/n, Col. Los Mangos, Ciudad Madero, Tam., Mexico. C. P. 89440.*

Abstract: In this work composites of polyvinyl pyrrolidone with graphite were fabricated. The composites were reinforced with cellulose nanocrystals (CNC), which had a nanometric size, with a hydrodynamic radius of 52 nanometers. The CNC increased the storage modulus of the composites up to 55%, compared to the blank sample. It was found that the optimal concentration of CNC in the composites was 1.0 weight percent.
Keywords: Storage modulus; nanocellulose; mechanical properties; binding agents.

1. INTRODUCCIÓN

Los nanocristales de celulosa (CNC) son un material que ha cobrado gran importancia debido a su versatilidad y a sus propiedades. Los CNC se derivan de la celulosa, un material natural no tóxico, biodegradable y amigable con el medio ambiente (Habibi y col. 2010). La celulosa tiene partes amorfas y cristalinas. El método tradicional de extracción de los CNC es mediante una hidrólisis ácida, usualmente con ácido sulfúrico. Durante el proceso, el ácido ataca las partes amorfas y libera las cristalinas, obteniéndose un material altamente cristalino. El proceso produce reacciones en los grupos funcionales de la superficie de los CNC, produciendo CNC funcionalizados, que confieren estabilidad a los nanocristales. Estos grupos generalmente tienen carga negativa, que se encarga de otorgar estabilidad coloidal a los CNC. Esta carga negativa también actúa como atracción electrostática, lo cual puede ser aprovechado para aplicaciones como agente aglutinante.

En este trabajo, se hicieron compósitos de poli (vinil pirrolidona), (PVP) y grafito, a los cuales se les añadió CNC como agente aglutinante, para explorar y cuantificar la efectividad de los CNC como agente aglutinante. Los CNC se han usado previamente como agente aglutinante en supercapacitores de carbón activado y de grafito (Castro-Guerrero y col., 2023), lo que previene que se desmorone el electrodo del capacitor. Esta es una aplicación novedosa, ya que usualmente se usan nanofibras de celulosa o una solución de teflón como aglutinantes en capacitores y supercapacitores (Tayeb y col., 2018). El teflón es muy buen aglutinante, usado ampliamente en capacitores y supercapacitores, pero no es soluble en agua y por lo tanto contribuye a la contaminación ambiental (Tayeb y col., 2018). Los capacitores y supercapacitores son dispositivos de almacenamiento de energía, lo que es un área crucial en la actualidad para mitigar la intermitencia de las energías limpias, necesarias para prevenir el calentamiento global. La búsqueda de aglutinantes efectivos para los capacitores es un área crucial para el almacenamiento de energía.

2. METODOLOGÍA

2.1 Síntesis

Los CNC se fabricaron por el método del ácido sulfúrico. 1 gramo de α-celulosa (Aldrich), se dispersa en 17.5 mL de ácido sulfúrico 64% peso (Analytyka). El proceso se realiza a 45°C durante 45 minutos (Castro-Guerrero y col., 2020). Al terminar, se diluye por un factor de 10 la suspensión con agua helada. La suspensión se decanta, y el proceso se repite. Posteriormente, los nanocristales se someten a diálisis bioquímica hasta que el efluente alcanza un pH neutro. Posteriormente, los nanocristales se sonican con un sonicador de 200 W de potencia. Después, se filtran con filtros Merck con poro de 450 nm. Finalmente, se tratan con una resina de intercambio iónico, para asegurar la protonación total de los CNC.

Los CNC fueron usados para reforzar compósitos de PVP/grafito, los cuales se fabricaron de la manera siguiente. La PVP (Sigma-Aldrich, M_n= 40,000) fue disuelta en agua al 5% peso, posteriormente, se añadió grafito (Aldrich, polvo, sintético, poro <20 μm) hasta alcanzar la concentración de 1% peso. Los CNC se añadieron hasta alcanzar diferentes concentraciones peso, las cuales son mostradas en la tabla 1.

ISSN: 2992-8338

Tabla 1. Concentraciones de CNC

Muestra	Concentración de CNC, % peso
Blanco	0.0
CNC1	0.1
CNC2	0.2
CNC3	0.5
CNC4	1.0
CNC5	2.0

2.2 Caracterización

Las muestras fueron caracterizadas mediante diferentes técnicas. La técnica de dispersión de luz dinámica (DLS, por sus siglas en inglés) fue utilizada, usando un equipo marca Anton Paar, modelo Litesizer 500.

Las muestras fueron analizadas por medio de la técnica de Análisis Dinámico Mecánico (DMA, por sus siglas en inglés), usando un equipo marca TA Instruments DMA, modelo Q800. El análisis se hizo en el rango de temperatura de 25 a 200°C, con una tasa de calentamiento de 5°C/min, usando una frecuencia de 1 Hz y una mordaza dual.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El radio hidrodinámico de los CNC fue medido, y se obtuvo un valor de 52 nm, con una variación de ±28.5 nm, lo cual es mostrado en la figura 1. En la figura se observa un pico en 52 nm, esto indica el radio hidrodinámico de los CNC, y que el diámetro de los CNC es menor a 52 nm, ya que el radio hidrodinámico es mayor al diámetro.

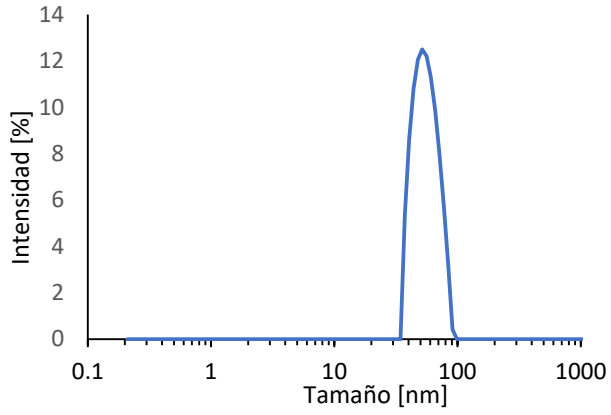


Figura 1.- Radio hidrodinámico de los CNC.

Las propiedades mecánicas fueron evaluadas por DMA. La figura 2 muestra los resultados obtenidos por DMA.

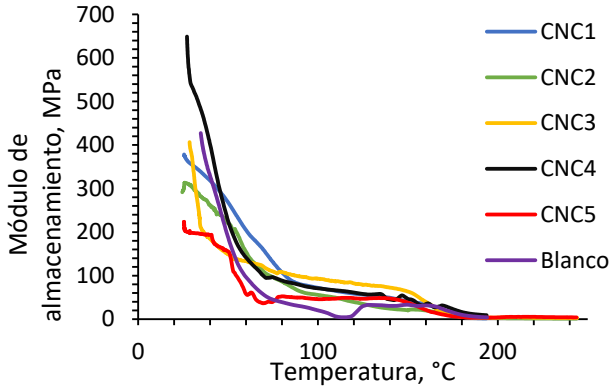


Figura 2.- Curvas DMA de los CNC.

En la figura 2, el blanco comienza con un módulo de almacenamiento (MA) de 418 MPa. La adición de los CNC inicialmente reduce el módulo de almacenamiento. Posteriormente, al llegar a la concentración de 1.0 % peso, se alcanza el máximo del módulo de almacenamiento, el cual es de 649 MPa, un incremento del 55%. Respecto a CNC1, el incremento en el MA es del 70%. De este dato se obtiene que la concentración óptima de CNC es de 1.0 % peso. Posterior a esto, se observa una disminución en el MA. La tendencia observada es una disminución del MA respecto al blanco, sin embargo, la muestra CNC4 presenta el mayor módulo de todas las muestras, como se mencionó arriba, posterior a esto, el MA vuelve a reducirse. La disminución en el MA en el rango 0 a 0.5% peso, y la posterior disminución a 2% peso se atribuye a una mayor rigidez de las muestras debido a la presencia de los CNC.

La estabilidad de las muestras conforme aumenta la temperatura también se incrementa con la adición de los CNC, como puede verse en la figura 2. Se observa la aparición de una meseta en la muestra CNC5, entre 90 y 130°C, lo que implica una mayor estabilidad de la muestra. En las muestras CNC3 y CNC4 se observa también la tendencia, aunque ambas muestras presentan una reducción gradual en el módulo de almacenamiento en la región de 70 a 140°C, provocada por el efecto aglutinante de los CNC, que estabilizan la muestra debido a atracciones electrostáticas entre los grupos funcionales de PVP, y los enlaces π del grafito (Castro-Guerrero y col., 2023; Sobhan y col. 2019).

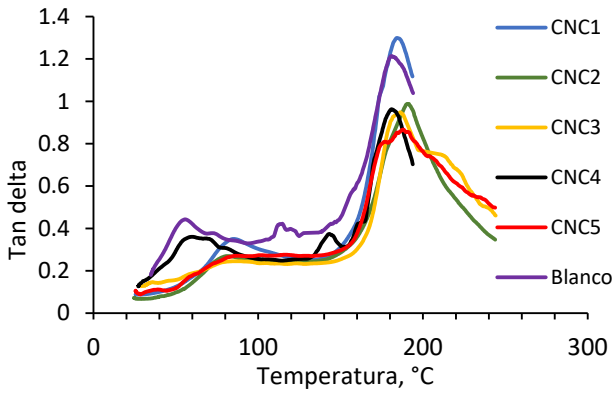


Figura 3.- Curvas del tan delta de los compósitos.

ISSN: 2992-8338

La figura 3 muestra las curvas de tan delta del DMA. En todas las muestras se observa una temperatura de transición vítrea (T_g) en el rango de 180 a 190°C, atribuidas a la presencia de la PVP. Se observa en general una tendencia a incrementar la T_g, debido al confinamiento macromolecular provocado por la superficie de los CNC en el compósito (Tucureanu y col.). Los valores medidos sugieren una asociación de las cadenas de PVP por la presencia de los CNC (Voronova y col., 2018).

4. CONCLUSIONES

Los CNC tuvieron un tamaño nanométrico, que ayuda a incrementar las propiedades mecánicas de los compósitos. Los CNC aumentaron la rigidez de las muestras, que provocó en algunas una disminución en el módulo de almacenamiento. Sin embargo, la muestra CNC4 tuvo el mayor módulo de almacenamiento, mostrando un incremento del 55% respecto al blanco. La concentración óptima de CNC en el compósito fue de 1.0% peso. Concentraciones mayores a esta concentración provocaron una disminución en el módulo de almacenamiento. Estos resultados sugieren de trabajo futuro el desarrollo de supercapacitores conteniendo CNC, y la evaluación del mejoramiento de las propiedades mecánicas de compósitos de CNC con grafito.

REFERENCIAS

Castro-Guerrero, C. F., González-Benítez, A., Rodríguez-Rodríguez, A., Delgado-Arroyo, F., León-Silva, U., Morales-Cepeda, A. B., López-González, F. A., Rodas-Grapain, A., Díaz-Guillén, M. R. (2023). Optimization of the Synthesis Parameters and Application of Cellulose Nanocrystals as Binders in Capacitors, *International Journal of Polymer Science*, 2023, 2842385.

Castro-Guerrero, C. F., Morales-Cepeda, A. B., Díaz-Guillén, M. R., Delgado-Arroyo, F., López-González, F. A. (2020). Self-ordered cellulose nanocrystals and microscopic investigations, *Materials Science-Poland*, 38, 613-618.

Habibi, Y., Lucia, L. A., Rojas, O. J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly and applications. *Chemical Reviews*, 110, 3479-3500.

Sobhan, A., Muthukumarappan, K., Cen, Z., Wei, L. (2019). Characterization of nanocellulose and activated carbon nanocomposite films' biosensing properties for smart packaging, *Carbohydrate Polymers*, 225, 115189.

Tayeb, A. H., Amini, E., Ghasemi, S., Tajvidi, M. (2018). Cellulose Nanomaterials -Binding Properties and Applications: A Review. *Molecules*, 23, 2684.

Tucureanu, V., Matei, A., Avram, A. M. (2016). FTIR spectroscopy for carbon family study. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 46, 502-520.

Voronova, M., Rubleva, N. Kochkina N., Afineevskii, A., Zakharov, A., Surov, O. (2018). Preparation and characterization of polyvinyl pyrrolidone/cellulose nanocrystals composites. *Nanomaterials (Basel)*, 8, 1011.

ISSN: 2992-8338

Detection of Urbanization Levels for Categorization of Geographic Zones in Mexico Using Convolutional Neural Networks ⋆

José Ramón Ramírez Ruiz * **Elias Ruiz Hernández** **

* *TecNM-Instituto Tecnológico de La Piedad, La Piedad, México (e-mail: jora3175@gmail.com).*
** *TecNM-Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, Apan, México (e-mail: eruiz@itesa.edu.mx)*

Abstract: A model to recognize urbanization levels based on convolutional neural networks is presented. The model detects four levels of urbanization (non-urban, low-density urban, urban, and industrial). The performed model comprises eight layers and a classification layer for the four categories. Our model takes as input only visual data from satellite images in visible colour RGB scale and it was trained using data from Satelites Pro and WorldStrat to enhance its robustness by drawing from two distinct data sets. The proposed model aims to assist in detecting these levels of urbanization within a medium or large-sized city, automatically classifying them into these levels. The model exhibits higher accuracy in recognizing the industrial class within the urban environment, achieving 69% accuracy, and values of 63%, 83% and 90% for low-density urban, urban and non-urban classes, respectively.

Keywords: Artificial Intelligence, Remote sensor data acquisition, Convolutional Neural Networks (CNN), México, Fuzzy and neural systems relevant to identification,

1. INTRODUCTION

A considerable disparity exists between urban and rural areas in Mexico according to Llop et al. (2019) Even within the urban regions of medium and large-sized cities, degrees of disparity prevail. In other words, some cities possess regions with a lower degree of urbanization, while just a few kilometers away, there are industrial zones exhibiting a certain level of urban development, including asphalt roads, signage, serviced households, and traffic lights, among other visual and non-visual elements.

This work proposes the recognition of four degrees of urbanization through purely visual techniques, particularly employing images from satellites [Cornebise et al. (2022)]. The suggested model employs a non-transferred convolutional neural network utilizing eight layers to automatically detect the four levels of urbanization in Mexican regions through a single satellite-derived RGB image.

Consequently, the hypothesis posits that detection relying solely on visual elements, such as avenue geometry, road texture, household density, vegetation quantity, and geometry of large-scale urban elements like factories, is feasible for the model to capture.

⋆ Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

2. RELATED WORKS

2.1 Identifying urban areas by combining human judgment and machine learning: An application to India

This article presents a methodology for identifying urban areas that combines subjective validation from machine learning and applies it to India, a country where several studies suggest that the official urbanization rate is underestimated. To gather significant samples from cities, towns, and villages, the study relied on four groups of evaluators differing in their familiarity with India and urban issues, following two distinct protocols. The classification is combined with population census data and satellite images from the population census to predict the urban situation of the sample.

The Logit model and LASSO methods, as well as the random forest method, were employed. These approaches were then used to determine whether each of India's administrative units outside the sample is urban or rural. In practice, the analysis does not conclusively affirm that India is substantially more urban than officially claimed. However, significant differences exist at disaggregated levels, with "other cities" and "census cities" being more rural and certain southern states more urban than officially stated. The coherence of human judgment among evaluators and protocols, the easy availability of crowdsourcing, and the stability of predictions among approaches suggest that the proposed methodology is a

ISSN: 2992-8338

promising avenue for studying urban issues Galdo et al. (2021).

2.2 Spatial segregation and urban form in Mexican cities

This article addresses socioeconomic and spatial inequalities in Mexican cities. Spatial accessibility is used as a tool to explain these disparities and inform urban planning. The potential of a spatial accessibility index for location and planning decisions benefiting the most residents is explored. Three sets of secondary geographic data are combined with geospatial analysis. First, two vital urban public services, healthcare, and education, are located, and catchment zones are generated based on their sizes. Then, integration values for each city at the metropolitan and district levels are calculated to observe how their configuration influences activity distribution and residents' way of life and mobility. Demographic data from the 2010 National Population and Housing Census are also analyzed at the residential block level Garnica-Monroy and Alvanides (2019).

2.3 Deep learning-based classification methods for remote sensing images in urban built-up areas

This study focuses on a deep learning-based classification method for built-up urban areas using remote sensing. Different deep neural networks, including a convolutional neural network (CNN) and capsule networks (CapsNet), are compared for classifying high spatial resolution remote sensing images with various changes and multi-scene classes. The results demonstrate that the SMDTR-CNN method achieved the highest overall accuracy (95.0%) and best kappa coefficient, improving accuracy for parking and residential samples by 1% and 4%, respectively. These findings are crucial for developing effective classification methods in built-up urban areas Li et al. (2019).

2.4 Identifying urban poverty using high-resolution satellite imagery and machine learning approaches: Implications for housing inequality

This article demonstrates that features derived from high-resolution satellite images and machine-learning approaches are useful for identifying urban poverty at the community level in China. Different image features are used for the Jiangxia and Huangpi districts in Wuhan, and four machine learning approaches and 25 variables are applied to identify urban poverty and the most important variables. The results show that these image features and machine learning approaches can be used to identify urban poverty, with a good model performance. Determination coefficients of 0.5341 and 0.5324 are found for Jiangxia and Huangpi, respectively. However, differences exist between approaches and study areas. It is highlighted that housing inequality within low-income neighborhoods is a significant manifestation of urban poverty, linked to wealth, income, and housing accessibility differences among social groups Li et al. (2021).

2.5 Frontiers of urbanization: Identifying and explaining urbanization hot spots in the south of Mexico City using human and remote sensing

This article proposes a multi-method approach for measuring urbanization dynamics using remote sensing information and human detection in a GIS platform. The results reveal that combining these data sources benefits the analysis of hot spots in a mega city like Mexico City, especially in identifying the expansion of illegal urban settlements. Furthermore, a strong association is found between the expansion of these illegal settlements and socioeconomic factors like unemployment. This raises new questions about the drivers of illegal growth in cities. However, this growth results in the loss of ecological zones in urban areas, leading to conflicts with legal settlements. This approach could be applied to other urbanization areas in Africa and Asia Lopez et al. (2017).

2.6 Urban areas analysis using satellite image segmentation and deep neural network

The research aims to develop methods based on convolutional neural networks to automatically detect building locations in high-resolution aerial images. The Sorensen-Dice similarity coefficient is used to evaluate the quality of the developed algorithms, comparing results with automatically generated real masks from JSON files. These masks and corresponding aerial images are divided into smaller parts for neural network training. It is demonstrated that deep neural networks implemented on the NVIDIA DGX-1 supercomputer's GPUs can efficiently learn and detect desired objects. Building detection in satellite images can have applications in urban planning, monitoring municipal building construction, and identifying optimal locations for future outlets, among others Khryaschev and Ivanovsky (2019).

Table 1. Comparison of the different scientific papers referenced in our article

Comparison between the articles							
	Our Model	2021	2019	2019	2021	2017	2019
Sentinel satellite	✓	χ	χ	χ	χ	χ	χ
LASSO Method	χ	✓	χ	χ	χ	χ	χ
Logit method	χ	✓	χ	χ	χ	χ	χ
Random forest method	χ	✓	χ	χ	✓	χ	χ
Landsat satellite	✓	✓	χ	χ	✓	✓	χ
Machine Learning	χ	✓	χ	χ	✓	χ	χ
Convolutional Neural Networks	✓	χ	χ	✓	χ	χ	✓
Use of Textual information for training an AI mode	χ	✓	✓	χ	χ	✓	χ
Deep Learning	χ	χ	χ	✓	χ	χ	✓

ISSN: 2992-8338

3. MATERIALS AND METHODS

3.1 Approach

The approach taken in this research involves the creation and implementation of a convolutional neural network (CNN) using a custom model. The goal is to ensure the AI's performance in recognizing satellite images, leveraging the efficiency of a neural network in learning complex patterns and features within images.

3.2 Initial Investigation and Dataset Selection

A comprehensive investigation was conducted to find suitable images for training the AI. After analyzing diverse options, the WorldStrat DataSet was chosen as the most comprehensive (Fig. 1). This dataset contains a substantial number of satellite images from around the world.

3.3 Dataset Analysis

The objective of analyzing the dataset was to determine the geographical origins of the images, with a preference for those from the Mexican territory. The metadata file of the dataset was used for this analysis, containing image data and coordinates. This information was combined with the Open Street Map API to ascertain the images' capture locations. Ultimately, 17 images belonging to the Mexican Republic were identified.

3.4 Creation of the New Dataset

The newly acquired Mexican satellite images need to be standardized for our CNN model. A Python script was used to divide the images into 16 smaller images each. This division aims to classify each quadrant of the original images into the corresponding category (non-urban, low-density urban, urban, and industrial). This process resulted in 504 images distributed across the mentioned four categories.

3.5 Construction of the CNN Model

For the model creation, the vgg16 architecture served as the foundation. However, noticing that more than 16 layers of depth did not provide the necessary recognition capabilities especially for low level visual details, an 8-layer custom convolutional neural network was developed. This new model follows the same structure as vgg16 but with only eight intermediate layers employing the ReLU activation function, and four outputs in the last layer (one for each category) using the softmax activation function (Fig. 2).

3.6 Development of a Test Dataset

After achieving an approximate 99% accuracy with the model, a new dataset was needed for evaluating the AI's effectiveness against diverse images. In this case, Satelites Pro, a tool similar to Google Maps but without labels for street names and borders, was used. Screenshots were taken from this tool to serve as test images. These screenshots were divided into 16 parts and classified into the relevant categories, thereby creating a test dataset.

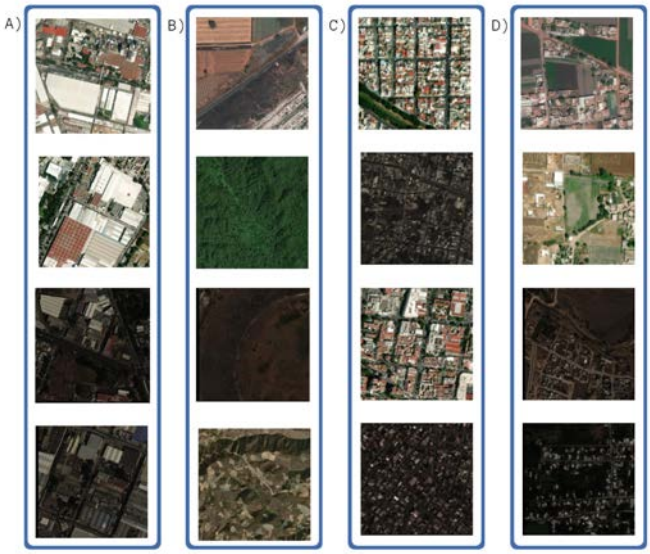


Fig. 1. Samples of the images of the different classes of the Dataset used to train the model: A)Industrial, B)Non-urban, C)Urban, and D) Low-density urban.

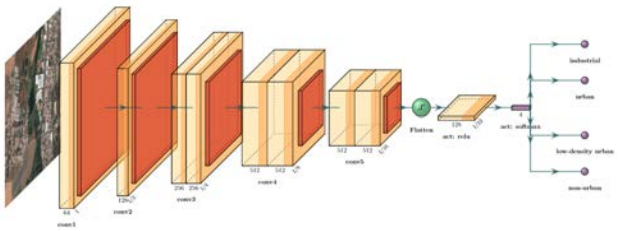


Fig. 2. Representation of the CNN model created. The model was developed with eight layers in order to detect more low level visual details from the images. This model was performed with the keras Framework.

4. PERFORMED EXPERIMENTS

4.1 Experimental Setup

We performed the experiments by adding another dataset in order to increase the robustness of the model. According to this, We used the WorldStrat dataset. This dataset includes approximately 100,000 km^2 of satellite images from various locations around the world, encompassing diverse ecosystems such as cities, fields, snowy terrains, forests, and more. It also includes a wide array of locations that are often underrepresented in similar datasets, including humanitarian points of interest, illegal mines, and settlements of people at risk.

To effectively work with the images and conduct both training and testing within a reasonable time frame, we utilized the Google Colab platform. This virtual environment leverages Google's server resources for model training and testing. Its significant feature is the provision of a free GPU, crucial for enhancing the execution time when working with AI models. Moreover, it allows for the connection of this execution environment with Google

ISSN: 2992-8338

Drive, facilitating image uploads for testing or training purposes.

4.2 Test Initiations

To begin the tests, we specified the directory paths containing the images to be evaluated, categorizing them for assessment. We modified the script to evaluate all images(884 images for training and 600 images for testing) within a category and stored the results in a spreadsheet file for subsequent analysis.

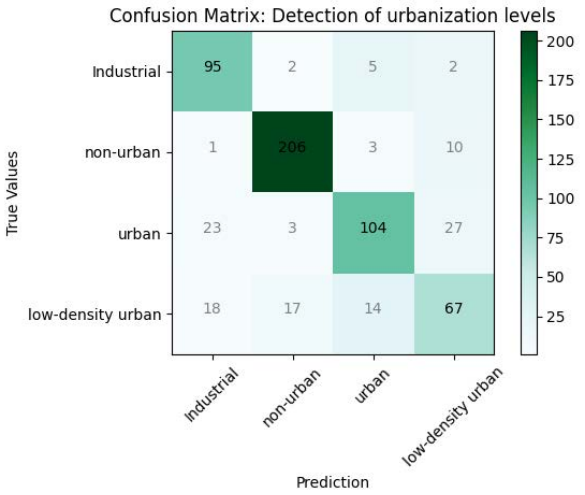


Fig. 3. Confusion matrix of the CNN model. As might be expected, there are better results in the non-urban category. However, the model capture visual differences between the three similar categories of different urban development levels.

4.3 Experimental Results

Upon completing tests for all four categories and analyzing the outcomes, it was determined that the model exhibited an effectiveness of 69% in evaluating images from the industrial class, 90% for the non-urban class, 83% for the urban class, and finally, 63% for the low-density urban class (Fig. 3). This indicates that the model demonstrates considerable accuracy in classifying images where there is no civilization. Notably, the model encounters challenges in distinguishing between industrial-type and low-density-urban-type images, as they often share similarities that can lead to confusion during common testing scenarios.

4.4 Discussion

In Fig. 4 we can see examples of correctly and incorrectly classified images. The determination of industrial zones, as well as high and low density urban zones, were determined by an expert in the domain. In the representation errors, type I and II errors (precision and recall, see Confusion matrix, Fig. 3) were observed mostly between the regions that share similarities, that is, the urban region with the low-density urban region by one hand; and the industrial region with the urban region on the other hand. It is noteworthy to say that, in order to test the robustness of the learned model, we worked with two different satellite image datasets: WorldStrat and Open Street Map. This test suggests that it is possible to work with visual information from different sources. The above takes into consideration that some databases such as WorldStrat do not contain so many images of Mexico to carry out a very extensive training and thus expanding the extraction of images from more cities will be necessary.

Fig. 4. Set A shows examples where the model had no problem identifying the classes: 1) it is industrial and was predicted as such, 2) it is non-urban and was predicted as such, 3) it is urban and was predicted as such and 4) it is low-density urban and was predicted as such. Set B shows intraclass errors: 1) industrial image predicted as urban, 2) non-urban image predicted as low-density urban, 3) urban image predicted as industrial, and 4) low-density urban image predicted as industrial.

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this work, a model to recognize four levels of urbanity in Mexican cities was developed. The model recognizes with a precision of 69% for the industrial category, a precision of 90% for the non-urban category, a precision of 83% for the urban category, and finally a precision of 63% for the low-density urban category. The proposed model allows us to better discriminate some cities in Mexico and be able to identify degrees of urban development with only satellite images. In the future, it is proposed to generate a map of urban development in cities in Mexico as well as a textual repository with the previous classification, incorporating geospatial data. Another interesting avenue is to explore a fuzziness level between regions that are relevant to two categories.

REFERENCES

Cornebise, J., Orsolic, I., and Kalaitzis, F. (2022). Open high-resolution satellite imagery: The worldstrat dataset – with application to super-resolution. In *Thirty-sixth Conference on Neural Information Processing Systems Datasets and Benchmarks Track*. URL https://openreview.net/forum?id=DEigo9L8xZA.

Galdo, V., Li, Y., and Rama, M. (2021). Identifying urban areas by combining human judgment and machine learning: An application to india. *Journal of Urban Economics*, 125, 103229.

ISSN: 2992-8338

Garnica-Monroy, R. and Alvanides, S. (2019). Spatial segregation and urban form in mexican cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(7), 1347–1361.

Khryashchev, V. and Ivanovsky, L. (2019). Urban areas analysis using satellite image segmentation and deep neural network. In *E3S web of conferences*, volume 135, 01064. EDP Sciences.

Li, G., Cai, Z., Qian, Y., and Chen, F. (2021). Identifying urban poverty using high-resolution satellite imagery and machine learning approaches: Implications for housing inequality. *Land*, 10(6), 648.

Li, W., Liu, H., Wang, Y., Li, Z., Jia, Y., and Gui, G. (2019). Deep learning-based classification methods for remote sensing images in urban built-up areas. *Ieee Access*, 7, 36274–36284.

Llop, J.M., Iglesias, B.M., Vargas, R., and Blanc, F. (2019). Las ciudades intermedias: concepto y dimensiones. *Ciudades*, (22), 23–43. doi:10.24197/ciudades.22.2019.23-43. URL https://revistas.uva.es/index.php/ciudades/article/view/2256.

Lopez, J.M.R., Heider, K., and Scheffran, J. (2017). Frontiers of urbanization: Identifying and explaining urbanization hot spots in the south of mexico city using human and remote sensing. *Applied Geography*, 79, 1–10.

ISSN: 2992-8338

Evaluation of mixing in a physical model of a continuous casting distributor using image analysis

J. C. Contreras Guzmán[*, **], J. B. Hernández Morales[**], C. Castillo Casasola[**], M. E. Andrade Sánchez[*]

** Tecnológico Nacional de México, sede Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TECNM-TES de Ecatepec). juancontreras@tese.edu.mx o iqm.jccg.2013@mail.com*

*** Facultad de Química, Depto. de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional Autónoma de México, MEXICO*

Abstract: This work describes a technique for the evaluation of mixing in a physical model of the continuous casting distributor and its respective comparison at different flows and heights of liquid bath. Water is used as the working fluid. The technique consists of image processing (cutting, subtraction and transformation into gray scales) to quantify the time it takes for a colorful tracer to reach each area of the system. In addition, the time that the tracer remains in each position from its arrival until it recovers the original tone is determined. It is shown that with the described technique it is possible to identify the areas in which the tracer remains for a longer time (upper corner) and the areas where the tracer remains for a shorter time (area close to the fluid drain).

Keywords: Physical modelling, image analysis, mixing in reactors, mixing time, metallurgical processes.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de procesos metalúrgicos tiene como principales herramientas (Themelis, 1972; Szekely,1987; Brimacombe, 1989; Ferguson et al,2009): la modelación matemática, experimentos en laboratorio para determinar parámetros de los modelos, plantas piloto y modelos físicos. Esta última es la representación del sistema de interés, conocido como prototipo, a través del uso de materiales diferentes que permitan manipular, instrumentar, cuantificar y evaluar la operación para entender fenómenos que no podrían ser evaluados fácilmente si se empleara el prototipo, debido a la opacidad en las paredes de los reactores, el trabajo a altas temperaturas, condiciones de alta presión o debido a la complejidad de los fenómenos, entre otros. Para que el prototipo y el modelo físico sean comparables se utilizan criterios de similitud (geométrica, mecánica, energética, másica, etc.) que suelen ser descritos a través de números adimensionales asociados a los fenómenos de interés (Mazumdar et al,2010). El uso de modelos físicos en la industria metalúrgica es amplio debido a que es posible emplear agua a temperatura como fluido de trabajo ya que sus propiedades, como la viscosidad cinemática, son similares a las que tienen los metales fundidos. Así mismo, se pueden utilizar reactores transparentes que permiten visualizar fenómenos de flujo de fluidos como el mezclado o la distribución de fluido. Se han empleado modelos físicos para estudiar el distribuidor de colada continua (Seshadri et al,2012; Zheng et al, 2016; Merder et al, 2013), proceso usado en la producción de acero y que consiste en un sistema en donde se vacía acero fundido a temperaturas superiores a los 1600 °C para que se homogeneice la temperatura, se permita que floten inclusiones y, en ocasiones, se agreguen componentes para refinar la composición química, y al final, dirigir el acero a múltiples salidas que lo llevan a los procesos de solidificación. En este caso, entender el comportamiento de los fenómenos de transporte (masa, energía y momentum) permite predecir su comportamiento y controlar su operación buscando mejorar su rendimiento.

Uno de los fenómenos de mayor estudio es la mecánica de fluidos. Si bien, se han alcanzado grandes mejoras en los métodos numéricos implementados en computadoras (*CFD*, *computacional fluid dynamics* por sus siglas en inglés), muchas veces es necesario validar estas respuestas con la experimentación. En este sentido, los modelos físicos ofrecen la posibilidad de obtener información, de tal modo que a través de dos técnicas (modelación física y matemática) se fortalezcan las conclusiones resultantes. Las técnicas empleadas para evaluar el comportamiento del fluido son muy variadas, desde el uso de trazadores que permiten medir la respuesta en puntos específicos (mediciones locales) hasta la evaluación de características que engloben a todo el sistema al mismo tiempo (mediciones globales). Se pueden utilizar sustancias que funcionen como trazadores, los cuales dejan un rastro a medida que el sistema se moviliza debido a los diferentes mecanismos que ocurren. Entre los trazadores más empleados se encuentran: soluciones de tipo ácidas o básicas que permiten medir pH, soluciones salinas que permiten medir la conductividad eléctrica, colorantes para ver su distribución en el sistema e incluso partículas que permiten evaluar campos vectoriales al emplear tecnologías muy sofisticadas que emplean planos laser y cámaras de alta velocidad. Para visualizar los fenómenos se utilizan cámaras de diferentes características (cámaras de vídeo, cámaras termográficas, cámaras de alta velocidad y resolución, etc.), que permiten registrar los cambios en el sistema.

ISSN: 2992-8338

2. METODOLOGIA

En este trabajo se utilizaron videograbaciones y mediciones de pH vs. tiempo obtenidas previamente por el grupo de trabajo, junto con un programa computacional para darle seguimiento al avance de un trazador ácido y colorido que es inyectado al interior de un modelo físico de acrílico que representa al distribuidor de colada continua con una entrada y dos salidas.

Cada video está constituido de múltiples imágenes, las cuales se extraen a través del uso del software VLC media. Las imágenes digitales están constituidas de dos elementos: pixeles, los cuales son recuadros que están ubicados en una posición particular y una cierta combinación de colores en cada píxel dado por un vector RGB (Red-Green-Blue) que son los colores básicos empleados en las imágenes digitales. Al tener una colección de pixeles se constituye una imagen.

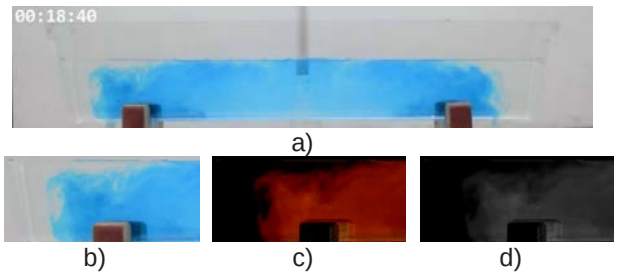


Figura 1. Ejemplos de resultados del procesamiento de imágenes. a) Imagen completa del sistema, b) recorte y extracción de la mitad del sistema, c) resta de imágenes instantánea y la imagen inicial y d) transformación a escala de grises. Las condiciones de operación son 4 LPM y una altura de 10 cm.

Al tomar como base la primera imagen del vídeo, se tiene el comportamiento del sistema aun sin cambio alguno. Cuando se agrega el trazador colorido este se distribuye en todo el sistema y al ser videograbado se tienen muchas imágenes de cómo se dan los cambios en la distribución del tono de color como una función del tiempo. Es posible realizar una operación matemática entre las imágenes, al considerar la imagen inicial (imagen base) y compararla con otra imagen a diferente instante; esta comparación se puede hacer a través de una resta, obteniendo como resultado zonas que resaltan al trazador y dejando una huella instantánea. Sin embargo, al hacer esa operación, los vectores RGB también son restados y hacer comparaciones con estos vectores se vuelve complicado debido a la gran cantidad de datos que se deberían de procesar. Para reducir esta dificultad, las imágenes resultantes pueden ser transformadas en escala de grises, lo cual reduce la cantidad de información con la cual operar, ya que el vector RGB se transforma en un solo valor de tonalidad. En la Figura 1 (a) se muestra una imagen extraída del video al instante 18.4 segundos. Como el distribuidor es un sistema simétrico, es posible segmentarlo en dos partes y también es posible eliminar de la imagen las regiones que no incluyen al fluido. Esto apoya la simplificación de operaciones. La imagen original tiene un tamaño de 1920 x 400 pixeles, mientras que la imagen de la mitad y la eliminación de secciones sin fluido (Figura 1 (b)) tiene un tamaño de 805 x 204 pixeles. Esto reduce a menos de la mitad el tiempo de procesamiento de las imágenes. En la Figura 1 (b) se muestra el recorte de la imagen original y en la sección (c) de la Figura 1 se muestra la resta entre la imagen base del vídeo y la imagen en un instante dado. Cuando esta última imagen se transforma en escala de grises se ve como la Figura 1 (d).

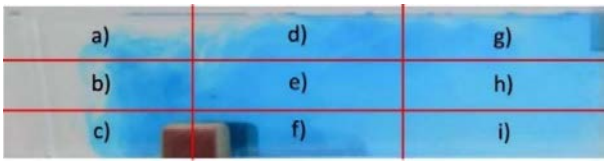


Figura 2. Segmentación del sistema en 9 zonas. Las condiciones de operación son 4 LPM y una altura de 10 cm instante 18.4 segundos.

Una vez que se ha hecho el recorte, la resta y la transformación a escala de grises de las imágenes a emplear, se pueden hacer otras operaciones que describan el comportamiento del trazador al interior del sistema. Una imagen se puede dividir en varias secciones, como se muestra en la Figura 2, que por simplicidad y para exponer la idea siguiente se segmentó en 9 partes. La primera evaluación que se realiza es de forma promediada, es decir, de cada segmento se evalúa el valor promedio de la tonalidad (en escalas de grises se puede considerar valores de 0 a 1, donde el cero corresponde a una tonalidad negra y 1 a una tonalidad blanca) de los pixeles que constituyen dicho segmento. El resultado corresponde al valor de tonalidad promedio a cada instante, haciendo posible graficarlo como función del tiempo para seguir su comportamiento. Se puede observar que las secciones que están cercanas a la salida (Figura 3 secciones g h e i) muestran un cambio de tonalidad en los primeros instantes del proceso, mientras que las zonas más alejadas (Figura 3 secciones a b y c) tardan varios segundos en mostrar cambios en la tonalidad, debido a que el trazador tiene que viajar una distancia mucho mayor.

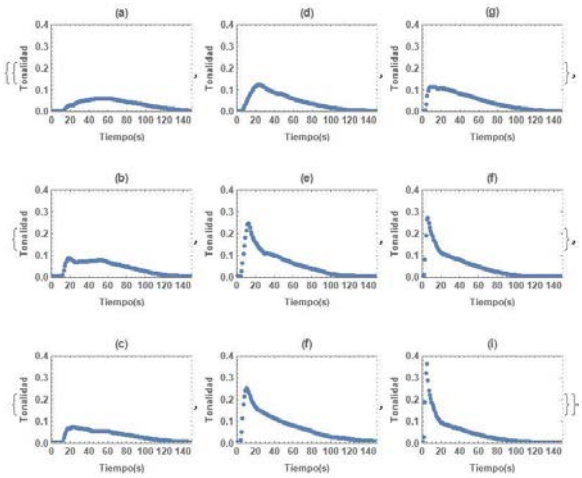


Figura 3. Evolución de la tonalidad promedio de cada segmento del sistema. Las condiciones de operación son: flujo de 4 LPM y altura de 10 cm

ISSN: 2992-8338

Una tendencia que se observa en los nueve segmentos de la Figura 3 (z) es que, después de cierto tiempo, la tonalidad se acerca al valor de cero, lo que es consecuencia de la resta de la imagen base y la imagen en esos instantes, mostrando que prácticamente ya se regresó a la condición inicial del sistema, es decir, que ya no hay trazador en su interior. Al ser un sistema continuo existe una renovación constante del contenido del distribuidor que se mezcla con lo que queda en el tanque; cuando el trazador sale por completo del sistema, el sistema habrá regresado a sus condiciones iniciales.

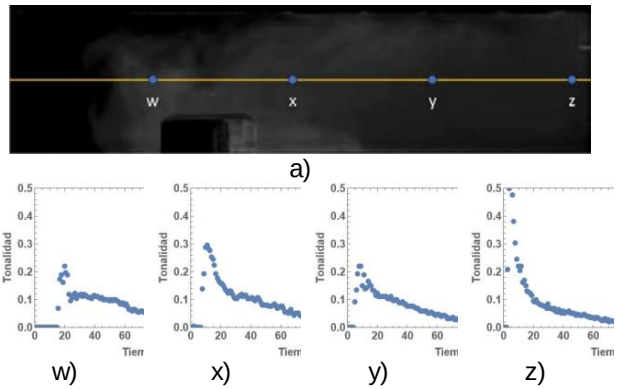


Figura 4 Evolución de tonalidad con respecto al tiempo en 4 posiciones diferentes (círculos azules) en el modelo físico. Las condiciones de operación son: flujo de 4 LPM y altura de 10 cm

Como se indicó al inicio, cada imagen está constituida de pixeles, por lo que se puede realizar un análisis similar al mostrado en la Figura 3 pero a una escala mucho menor. De esta manera, en la Figura 4 (a) se muestra una imagen de un instante dado y cuatro marcas de posición (círculos azules), mientras que en la sección (b) está la evaluación del cambio de la tonalidad con respecto al tiempo. Se observa un comportamiento similar al mostrado cuando se usaron regiones más grandes: a medida que la posición de análisis está más alejada de la zona de inyección de fluido, la tonalidad de la imagen tarda más en presentar cambios. Así mismo, es posible observar que la tonalidad máxima que alcanza cada posición evaluada es menor a medida que se está más lejos del punto de inyección, esto es acorde con la premisa de que mientras el trazador se distribuye en todo el volumen, el color producido tiene menor tonalidad por estar más diluido. Al final del ensayo, en cada posición la tonalidad regresa al valor de cero. En estos sistemas, uno de los fenómenos de interés relacionado con el campo de la dinámica de fluidos es el mezclado. La perspectiva propuesta se enfoca en el comportamiento de cada píxel, es decir, de la respuesta local obtenida a partir del análisis de imágenes. Para eso lo primero que se realiza es la evaluación del valor de tonalidad máximo en todas las imágenes empleadas. Este valor servirá como un valor límite. En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la posición mostrada en la Figura 4(a) punto "w". Se agrega una línea que representa el 5% de la tonalidad máxima obtenida de todas las imágenes. Se emplea este porcentaje para indicar un posible error y para identificar que existe la posibilidad de que el trazador todavía muestre variaciones, pero ya no sean significativas por estar en ese rango del 5%. Se propone la determinación de dos tiempos de interés: el primer tiempo es el de llegada del trazador, el cual se mide desde el inicio de la inyección del trazador y hasta la intersección con la línea del 5%, que estaría indicando el tiempo que tarda en llegar el trazador a ese píxel. El segundo tiempo de interés es el tiempo de permanencia que se determina desde que aparece un cambio significativo de tonalidad y hasta que la tonalidad vuelve a cruzar la línea del 5%. Esta evaluación de los tiempos se puede hacer a todas las imágenes y de esta manera determinar el tiempo de llegada y el tiempo de permanencia local.

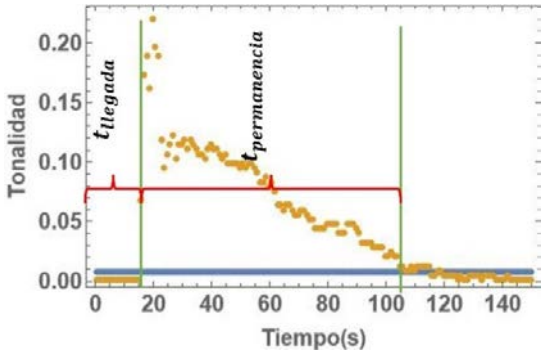


Figura 5. Descripción del comportamiento del mezclado a partir de la tonalidad del píxel posicionado en la Figura 4(a), punto "w". La línea azul indica el 5% del valor de tonalidad máxima de todas las imágenes.

3. DISCUSION DE RESULTADOS

Se trabajó con dos condiciones de operación en el modelo físico del distribuidor de colada continua. Se emplearon dos flujos de entrada (equiparables a la salida para mantener el sistema en estado estacionario): 4 LPM y 6 LPM. De igual forma, se evaluaron dos alturas de fluido en el distribuidor: a 10 cm y a 13 cm. Solo se realizaron tres experimentos: flujo 4, altura 10; flujo 4 y altura 13 y finalmente flujo 6 y altura 13 cm.

Los resultados obtenidos del tiempo de llegada y el tiempo de permanencia se grafican a través del uso de graficas de densidad, las cuales, a partir del valor que se tenga de un escalar dad una posición se colorea con base a una escala (en este trabajo se usó una escala tipo temperatura, donde los colores azules corresponden a tiempos cercanos al cero, mientras que las tonalidades rojas indican los valores máximos de tiempo) en una escala de color indica el valor. En la Figura 6 se muestran los resultados del tiempo de llegada en cada una de las condiciones experimentales aplicadas. Se observa que las zonas donde se tarda más en llegar el trazador son las esquinas de la parte superior izquierda. Adicionalmente, estas zonas son muy marcadas cuando se trabaja a flujos de 4 LPM, mientras que son reducidos cuando se trabaja a un flujo de 6 LPM. Las regiones que aparecen al lado izquierdo en blanco representan los límites físicos del sistema (bordes del modelo físico), mientras que el rectángulo de la base es parte de la

ISSN: 2992-8338

estructura de soporte del modelo, la cual es opaca y genera cierta interferencia en los resultados, dejando una huella.

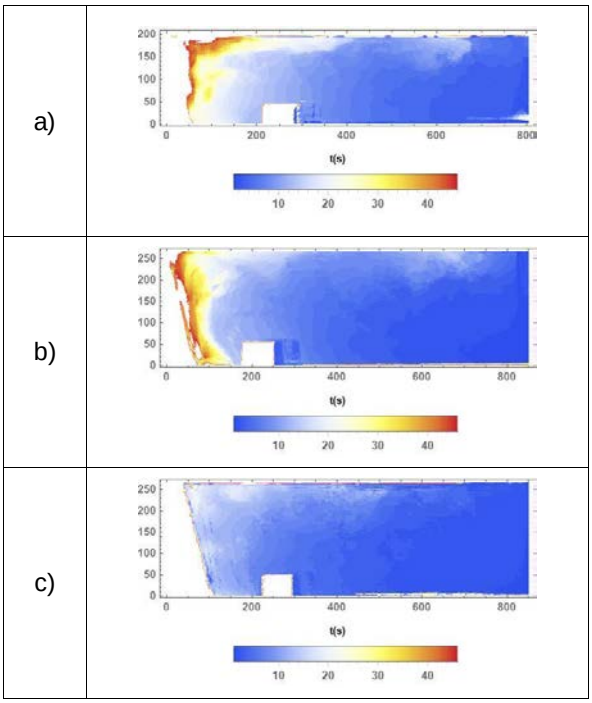


Figura 6. Distribución del tiempo de llegada del trazador para las condiciones estudiadas. a) Flujo 4 LPM y altura 10 cm, b) Flujo 4 LPM y altura 13 cm y c) Flujo 6 LPM y altura 13 cm.

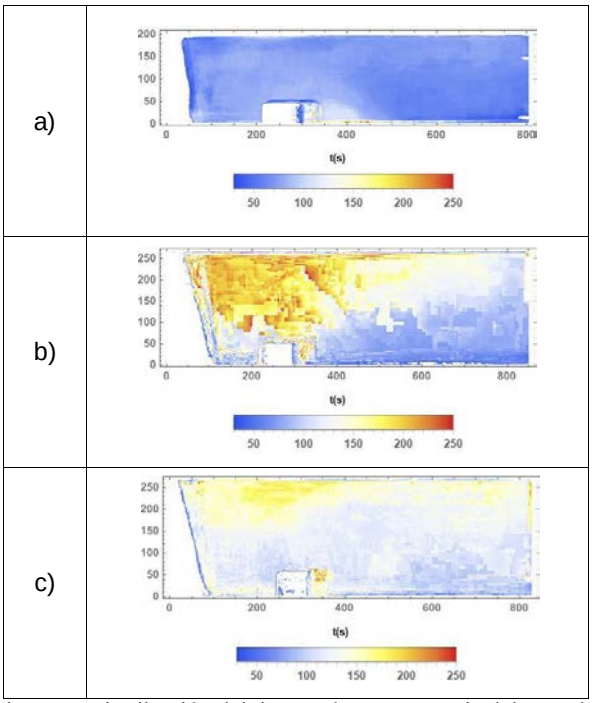


Figura 7. Distribución del tiempo de permanencia del trazador para las condiciones estudiadas. a) Flujo 4 LPM y altura 10 cm, b) Flujo 4 LPM y altura 13 cm y c) Flujo 6 LPM y altura 13 cm

Con respecto al tiempo de permanencia del trazador, se observa como los menores tiempos ocurren cuando se tiene una altura de 10 cm y un flujo de 4 LPM, mientras que los tiempos más largos son para las condiciones de mayor altura (13 cm) y flujo de 6 LPM.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo busca incorporar el análisis de imágenes como una técnica que se pueda emplear para describir de manera local el comportamiento de un trazador inyectado a un modelo físico. Hay consideraciones que tener ante el uso de esta técnica. Entre ellas esta: la calidad de los vídeos (tanto en iluminación como en resolución), la cantidad de fotogramas empleados, el tamaño del sistema y el trazador usado. Para las condiciones de operación, se observó que a menor flujo es mayor el tiempo que tarda el trazador en llegar a las zonas lejanas a la inyección de fluido (zonas de color naranja y blanca en la Figura 6) y el trazador permanece más tiempo al interior del sistema en la parte superior (zona de menor mezcla mostrada en color naranja y blanco en la Figura 7). A mayor altura, el tiempo de llegada y de permanencia es mayor.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por el TECNM a través de la Convocatoria 2023: Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación.

Así mismo se agradece el apoyo del COMECYT.

6. REFERENCIAS

N.J. Themelis (1972), “Techniques of process análisis in extractive metallurgy”, *Metallurgical Transactions*, Vol 3, August, pp 2021-2029

J. Szekely (1987) “The mathematical modeling revolution in extractive metallurgy”, *Metallurgical transactions B*, Vol. 19B, August, pp 525-540

J. K. Brimacombe (1989), “The extractive metallurgist in an emerging world”, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 20B, June, pp 291-313

D. Ferguson, W. Chen, T. Bonesteel, J. Vosburgh (2009), “A look at physical simulation of metallurgical processes, past, present and future”, *Materials Science and Engineering A* 499, pp 329-332

D. Mazumdar, J.W. Evans,(2010), “Modeling of steelmaking processes”, *CRC Press, Taylor and Francis Group LLC*, pp 99-113

V. Seshadri, C. Antônio da Silva, I. Alves da Silva, E. da Silva (2012), “A physical modelling study of inclusion removal in tunduhs using inert gas curtain” *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, Sâo Paulo, Vol 9, n.l.p 22-29, jan-mar.

S. Zheng, M Zhu, Y. Zhou, W. Su (2016), “Flow characteristics and inclusión removal in a Ten-strand continous casting tundish: physical modelling and industrial trials”, *Journal of iron and Steel research, international*, 23(2), pp 92-97

ISSN: 2992-8338

T. Merder, J. Pieprzyca, M. Saternus (2013), “Analysis of residence time distribution (RTD) curves for T-type tundish equipped in Flow control devices: physical modelling”, *Metalurgija 53* (2014) 2, pp 155-158.

ISSN: 2992-8338

Intelligent weapon detection system using computer vision

GF Pérez-García*, EN Escobar-Gómez*, JA Sarmiento-Torres*, IE Juárez-Ruiz*, A de Jesús Flores-García *

**Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México (e-mail: gilbert.pg@tuxtla.tecnm.mx, enescobarg@tuxtla.tecnm.mx, jorge.st@tuxtla.tecnm.mx, itzel.jm@tuxtla.tecnm.mx, alexis.fg@tuxtla.tecnm.mx)*

Abstract: An intelligent weapons detection system that uses artificial vision is introduced in this study. The system is designed to improve security in crucial environments such as airports, schools, and private areas. The system generates a discreet and immediate alarm when it detects a potential firearm, notifying the relevant authorities and, in turn, speeding up response times. At the same time, it transmits the captured images to a centralized database that maintains a historical record. This information is presented in a web application that monitors alerts in real-time and notifies the authorities immediately. The YOLO object detection model, specifically version 8, is used for this purpose. The training process is carried out using a custom dataset consisting of 9,000 images, with an mPA value of 98.271%.

Keywords: Deep learning, weapon detection, Internet of Things, convolutional neural networks, computer vision, YOLOv8.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la seguridad pública se ha consolidado como una cuestión de interés urgente, agravada por el crecimiento de las áreas urbanas y la creciente complejidad de los entornos metropolitanos. Estos factores han propiciado un aumento de los incidentes delictivos, con un enfoque crítico en aquellos que involucran armas de fuego, dispositivos con el potencial de infligir daño físico y, en situaciones extremas, de arrebatar vidas humanas. La expansión de la violencia armada ha inmerso a la sociedad en un escenario preocupante, en el que la seguridad de los ciudadanos se halla en un estado constante de riesgo. Abordar esta problemática se ha convertido en una prioridad nacional que exige la colaboración de diversas disciplinas y tecnologías. La implementación de sistemas de videovigilancia y alarmas ha sido una estrategia clave para afrontar este desafío. Sin embargo, los tiempos de respuesta están intrínsecamente ligados a la atención del personal de monitoreo y a la velocidad con la que se reacciona ante una alarma en el lugar de los acontecimientos. Con el inminente desarrollo tecnológico y científico, emergen no solo dispositivos electrónicos con capacidades avanzadas, sino que también áreas de investigación de vanguardia, como la visión artificial y el Internet de las Cosas (IoT) (Castillo, 2019). Estas herramientas en conjunto, poseen el potencial de mitigar con esta problemática de forma eficaz e inmediata, permitiendo la identificación de objetos de interés y facilitando comunicaciones remotas efectivas e instantáneas. Además, disciplinas como las redes neuronales y el aprendizaje profundo dotan a un sistema de vigilancia tradicional no solo de funcionalidad efectiva, sino también de una mayor inteligencia y capacidad de respuesta.

El objetivo central de esta investigación es el desarrollo de un sistema que posibilite la identificación de situaciones delictivas, en particular, la detección de armas de fuego en el entorno bajo vigilancia y la emisión oportuna de alarmas con el fin de facilitar una intervención inmediata. Las predicciones generadas se transmiten de forma remota a un servidor y se presentan de manera visual a través de una página web diseñada específicamente para la emisión de alertas. En el ámbito de la detección de objetos, existen diversos algoritmos basados en redes neuronales; en este estudio, se aprovecha el algoritmo de detección de objetos conocido como YOLOv8 (You Only Look Once) para procesar información en tiempo real y llevar a cabo la detección de armas. Este trabajo aporta contribuciones significativas en múltiples dimensiones. En primer lugar, se presenta un conjunto de datos meticulosamente seleccionado, compuesto por imágenes obtenidas tanto de fuentes en línea como por imágenes generadas internamente. En segundo lugar, se desarrolla un modelo neuronal específicamente entrenado, garantizando una detección exitosa con un valor mAP del 98.271%. En tercer lugar, se establece un entorno modular con la capacidad de transmitir una captura de la escena cada vez que se realice una detección positiva, almacenando la información en un servidor en la nube y generando alarmas visuales y auditivas para notificar a las autoridades pertinentes. La visualización de la información se lleva a cabo de forma remota a través de una página web desarrollada con este propósito. En conjunto, nuestras contribuciones permiten acortar significativamente los tiempos de respuesta, al contar con un sistema inteligente que emite alarmas oportunas de manera remota cada vez que se detecta un arma de fuego en el escenario bajo vigilancia. Este estudio promete desempeñar un papel fundamental en el avance de la seguridad pública y la mitigación de la violencia armada en los entornos urbanos contemporáneos.

ISSN: 2992-8338

2. ESTADO DEL ARTE

En la literatura relacionada con la identificación de armas de fuego, se han propuesto diversas metodologías. Entre estas, se destacan tecnologías basadas en semiconductores, redes neuronales y la interesante técnica del Alineamiento Temporal Dinámico (DTW), por mencionar algunas.

En particular, en un estudio reciente (Jones, 2021), se propone una aproximación innovadora para identificar armas de fuego utilizando tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID). Los autores subrayan la economía de su implementación en comparación con otras metodologías, aunque es importante señalar que su enfoque se limita a la detección local. Otra línea de investigación ampliamente explorada y relacionada con este trabajo es el uso de redes neuronales. Por ejemplo, en el trabajo (Mehta, 2020), se presenta un modelo de aprendizaje profundo basado en el algoritmo de detección YOLO en su versión 3. Sin embargo, este enfoque no reporta la implementación de un sistema de generación de alarmas remoto. En otro studio (Chatterjee, 2023), los autores proponen un modelo de detección de armas de fuego mediante el uso de técnicas de aprendizaje profundo. Este trabajo aborda diferentes modelos de detección, incluyendo una red neuronal convolucional basada en una región rápida conocida como Faster RCNN y utiliza las últimas arquitecturas basadas en EfficientDet. Los resultados son prometedores, con precisiones promedio de 77.02%, 16.40% y 29.73% para las métricas mAP0.5, mAP0.75 y mAP[0.500.95], respectivamente, sin reporter un sistema de alarmas remoto. Por otra parte, en un enfoque alternativo, el trabajo (Welsh, 2021) se enfoca en la aplicación del Alineamiento Temporal Dinámico como un clasificador de disparos basado en retroceso. El autor se dedica a la recopilación de datos provenientes de dos armas diferentes y seis categorías distintas de munición. Además de la evaluación del uso de medidas de distancia en el clasificador FDTW-1NN, presentan un clasificador propio denominado Hybrid-NBTree. Estas investigaciones ilustran la variedad de enfoques y técnicas utilizadas para abordar el desafío de la identificación de armas de fuego en diversas situaciones, ofreciendo valiosas perspectivas sobre el desarrollo de sistemas efectivos en este dominio (Broadway, 2022). No obstante, todos los estudios se centran en la identificación de armas de fuego sin proporcionar una herramienta que pueda agilizar los tiempos de respuesta en escenarios de crimen. Para abordar este desafío, se requiere la implementación de un sistema basado en tecnología IoT con el propósito de transmitir información a una base de vigilancia centralizada para facilitar la respuesta inmediata de las autoridades pertinentes.

3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

A continuación se describe de forma detallada la metodología utilizada para el desarrollo del sistema propuesto. La configuración del sistema esta compuesto por una cámara de video y un ordenador monoplaca con conectividad a internet. En caso de identificar la presencia de un arma en el entorno, el sistema desencadena una serie de acciones, que incluyen la tranmisión de una captura de imágenes durante el proceso de detección y la transmisión de la ubicación, fecha y hora a una base de datos alojada en un servidor central. La información recopilada está accesible a través de una aplicación web, y cada vez que se guarda una nueva captura en el servidor, la página emite una alarma tanto visual como auditiva. Este enfoque no solo garantiza la eficaz detección de situaciones críticas, sino que también proporciona un aviso para una respuesta inmediata y destacada ante eventos de interés,

La implementación del sistema se lleva a cabo en un entorno cerrado con iluminación artificial de luz blanca, garantizando con esto, su eficacia independientemente de la hora en que se activen las alarmas. Para la captura de imágenes, se utiliza una cámara de video IMX219-1610IR con una resolución de 3280 x 2464 píxeles, visión nocturna y un amplio ángulo de apertura de 160 grados. Las imágenes se capturan a una resolución de 640 pixeles y a una velocidad de 30 fotogramas por segundo, lo cual se considera óptimo para la recolección de datos. Se sugiere instalar las cámaras en una perspectiva de vista superior para maximizar el campo de visión en el área de interés (ver Figura 1).

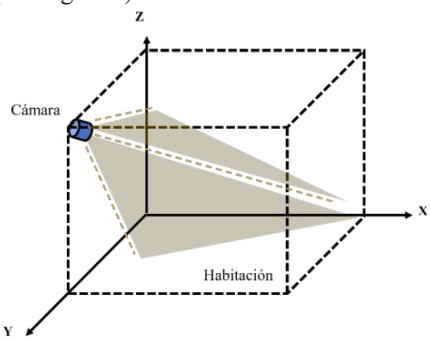


Figura 1. Distribución espacial de la escena

Las cámaras están conectadas a un ordenador monoplaca con acceso a internet, que desempeña un papel central en la detección de escenas delictivas. Este dispositivo central desempeña un papel crucial al albergar el algoritmo de reconocimiento de armas y la lógica necesaria para generar alarmas, así como para almacenar la información capturada en una base de datos alojada en un servidor web.

Aunque la conectividad inalámbrica de las cámaras no es estrictamente necesaria, se aconseja su uso para eliminar la necesidad de extensos cableados hacia el ordenador monoplaca. Esta opción no solo simplifica la instalación, sino que también permite el almacenamiento directo de la información en la base de datos, contribuyendo así a una configuración más eficiente.

La eficacia y rapidez en la detección y gestión de situaciones potencialmente peligrosas se ven optimizadas con esta configuración. La conectividad inalámbrica y el almacenamiento directo de datos mejoran la eficiencia del sistema, ofreciendo respuestas más ágiles ante amenazas.

En cuanto a la detección de armas de fuego, se propone la utilización del avanzado algoritmo de detección YOLOv8. Este algoritmo destaca por su alta velocidad, gracias al uso de una única red neuronal. Su capacidad para realizar entrenamientos completos mejora la precisión del sistema. A

ISSN: 2992-8338

diferencia de otras estructuras, YOLO opera con la imagen completa, reduciendo así la incidencia de falsos positivos.

La generación del modelo de aprendizaje se basa en la transferencia de conocimientos a través de la red neuronal Darknet. Sin embargo, es importante destacar que el entrenamiento de esta red requiere un conjunto de datos selecto, subrayando la importancia de una preparación adecuada para garantizar la efectividad del sistema de detección de armas.

3.1 Conjunto de datos y etiquetado

El conjunto de datos empleado se compone de dos conjuntos de imágenes:

a) Imágenes adquiridas de fuentes en línea.
b) Imágenes generadas internamente.

Las imágenes fueron seleccionadas imparcialmente, considerando distintos tamaños, perspectivas, posiciones del arma, iluminación, color, y variando géneros y edades de las personas que sostienen el arma. En la Figura 2 se observa un ejemplo de una imagen seleccionada para el conjunto de datos, descargada de internet.

Figura 2. Imagen de internet utilizada en el conjunto de datos

Para garantizar la claridad de la escena sin afectar la velocidad del análisis, las imágenes fueron redimensionadas a 640 píxeles. El etiquetado de objetos de interés se llevó a cabo con Anylabeling, una aplicación de código libre creada por Viet-Anh Nguyen. Esta herramienta combina características clave de Autolabeling y LabelImg, automatizando el proceso mediante una red neuronal llamada Segment Anything. La eficiencia de este algoritmo simplifica el etiquetado de imágenes, optimizando la preparación del conjunto de datos para el modelo de detección sin comprometer la velocidad del análisis, contribuyendo así a un sistema ágil y preciso.

Las etiquetas siguen un formato específico que permite definir de manera precisa el objeto de interés en las imágenes capturadas. El formato de etiquetado se estructura específicamente para el modelo de Yolo en el formato PyTorch, como se observa en la Figura 3.

‹índice clase›	‹Coord. central-eje X›	‹Coord. central-eje Y›	‹Ancho›	‹Alto›
0	0.5	0.5	0.9375	0.9166666666666666

Figura 3. Estructura de etiquetado - Modelo Yolo

El primer valor, con un índice de clase de 0, corresponde a la categoría 'arma'. Los dos valores subsiguientes representan las coordenadas centrales (en los ejes X e Y) de la región de interés etiquetada, mientras que los dos valores finales indican las dimensiones de la region, es decir, su ancho y alto. Para lograr esta normalización, las imágenes se ajustaron de acuerdo con las especificaciones de YOLO. Esto implicó el cálculo de una relación entre las coordenadas del centro de la etiqueta y las dimensiones de la imagen en términos de ancho y alto. Este procedimiento se llevó a cabo con el propósito de garantizar que las imágenes sean coherentes y adecuadas para el modelo de detección.

En total, el conjunto de datos utilizado en este estudio comprende de 9000 imágenes. Las imágenes se distribuyeron en dos bloques:

a) Conjunto de entrenamiento: 90% de las imágenes.
b) Conjunto de validación: 10% de las imágenes

La selección de imágenes se realizó de manera minuciosa, asegurando un equilibrio y una neutralidad adecuados en el conjunto de datos, lo que es esencial para la calidad y la validez de los resultados obtenidos en este trabajo.

Figura 4. Conjunto de datos, a) Imágenes de internet b) Imágenes propias.

3.2 Entrenamiento del modelo

Para llevar a cabo el entrenamiento del modelo de predicción, resultó esencial efectuar ajustes críticos en diversos parámetros. Estos ajustes abarcaron aspectos tales como la especificación de los directorios que albergaban tanto las imágenes como sus respectivas etiquetas, la definición del número de clases a detectar (en este caso, se trató de una única clase) y la designación del nombre de la clase a ser detectada, que en este caso fue "arma". Además, se optó por utilizar un modelo de YOLOv8 que había sido previamente entrenado en el conjunto de datos de COCO. En este proceso, se llevó a cabo un re-entrenamiento con el conjunto de datos seleccionado, lo que implicó la transferencia de conocimiento desde el modelo pre-entrenado.

En la Figura 5 se ilustra el modelo general de aprendizaje profundo propuesto y en la Tabla 1 se presenta una enumeración detallada de los parámetros que se configuraron al inicio del proceso de entrenamiento. Estos parámetros son

ISSN: 2992-8338

susceptibles de ser modificados y son fundamentales en el contexto del algoritmo YOLO, ya que influyen de manera significativa en la forma como se transmitirá el conocimiento.

Tabla 1. Parámetros de configuración - Modelo YOLO

Párametro	Configuración
Epoch	30
Batch_size	10
Image_size	640
IoU	0.7
lr0	0.01
lrf	0.01
Momentum	0.937
Attenuation Coefficient	0.0005
Optimizador	SGD

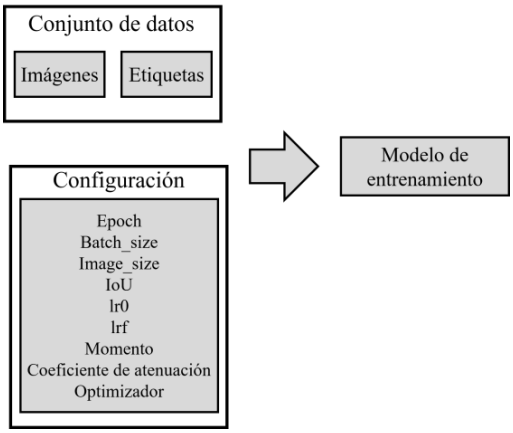


Figura 5. Modelo de aprendizaje profundo propuesto

El proceso de entrenamiento del modelo se llevó a cabo utilizando Ultralytics YOLOv8.0.20 en un entorno configurado con Python-3.10.12, torch-2.1.0+cu118 y CUDA:0 (Tesla T4, 15102MiB) para aprovechar el potencial de procesamiento de la tarjeta gráfica.

El sistema de cómputo se conformó con dos unidades de procesamiento central (CPU) con un total de 12.7 GB de memoria RAM. Además, se contaba con un espacio en disco de 27.1 GB de 78.2 GB disponibles para el almacenamiento de datos y modelos. Este entorno tecnológico y de hardware proporcionó la capacidad y el rendimiento necesarios para el proceso de entrenamiento y validación del modelo de detección de objetos.

3.3 Internet de las cosas

En el contexto de esta investigación, se han delineado dos objetivos cruciales: la precisa detección de armas de fuego en un entorno de vigilancia y la notificación inmediata a las autoridades pertinentes con el fin de emprender medidas preventivas, la transmisión remota de datos desempeña un papel preponderante en una diversidad de aplicaciones, debido a las múltiples ventajas que proporciona, tales como la comunicación instantánea y el monitoreo en tiempo real de situaciones de interés.

En esta sección, se presenta el desarrollo físico del sistema propuesto, diseñado para la captura y transmisión de las escenas de detección, hacia un servidor centralizado. La programación y lógica subyacente se llevaron a cabo mediante el lenguaje de programación Python. El sistema también se vale de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT) con la finalidad de facilitar la gestión y visualización remota de la información recopilada. La configuración de acceso a las cámaras de video y la implementación de la lógica para la captura de imágenes se realizaron haciendo uso de las bibliotecas de OpenCV.

La transferencia de las imágenes desde el cliente, que en este caso es un ordenador monoplaca, hacia el servidor se efectuó mediante la implementación de un método POST en Python. El método POST ofrece seguridad al momento de enviar los datos dentro del cuerpo de la solicitud, además de permitir el envío de datos en gran volume y de manera confidencial. En el entorno del servidor, la información enviada por el ordenador monoplaca se procesa haciendo uso del lenguaje de programación PHP. En la Figura 6 se observa un fragmento del código en PHP proporcionado para verificar si se ha enviado un archivo de la predicción realizada y, en caso afirmativo, implementa un método para verificar si la información es correcta. Esta comprobación se basa en el uso de la variable `$_FILES`, que es una matriz superglobal en PHP utilizada para manejar archivos enviados a través de un formulario HTML.

Las etapas clave de la verificación son las siguientes:

1. Se comprueba si la variable `$_FILES["imagen"]` está configurada y si el valor de `$_FILES["imagen"]["error"]` es igual a `UPLOAD_ERR_OK`. Esto verifica si se ha enviado un archivo y si la carga no ha producido errores.

2. Se verifica la extensión del archivo para asegurarse de que sea una imagen válida. Esto se logra al comparar la extensión del archivo (obtenida mediante `pathinfo()`) con una lista de extensiones permitidas (en este caso, "jpg", "jpeg", "png", "gif").

3. Si el archivo cumple con las condiciones anteriores, se intenta moverlo al directorio de destino (`$uploadFile`) mediante la función `move_uploaded_file()`. Si esta operación tiene éxito, se muestra un mensaje indicando que la imagen se ha subido exitosamente. En caso de que falle, se muestra un mensaje de error.

ISSN: 2992-8338

```php
<?php
$targetDir = "uploads/";
$uploadFile = $targetDir . basename($_FILES["imagen"]["name"]);

if (isset($_FILES["imagen"]) && $_FILES["imagen"]["error"] ===
    UPLOAD_ERR_OK) {
    $allowedExtensions = ["jpg", "jpeg", "png", "gif"];
    $fileExtension = strtolower(pathinfo($_FILES["imagen"]["name"],
        PATHINFO_EXTENSION));

    if (in_array($fileExtension, $allowedExtensions)) {
        if (move_uploaded_file($_FILES["imagen"]["tmp_name"], $uploadFile))
            {
            echo "La imagen se ha subido exitosamente.";
```

Figura 6. Fragmento de código de php para envío al servidor

El desarrollo de la interfaz web se llevó a cabo empleando tecnologías fundamentales como HTML, CSS y JavaScript, con el propósito de permitir la visualización remota de las imágenes. Para habilitar una experiencia de usuario ágil y dinámica, se utilize una función encargada de cargar y mostrar una lista de imágenes en una página web y asegurar que la interfaz de usuario se actualice solo cuando se detecten predicciones nuevas, evitando actualizaciones innecesarias.

Para esto, se utilizó una variante de JavaScript conocida como AJAX (Asynchronous JavaScript and XML). AJAX posibilita la comunicación asíncrona entre el navegador y el servidor web, lo que implica que los datos pueden ser transmitidos y recibidos en segundo plano sin necesidad de recargar la página por completo. Este enfoque, sin duda, contribuye a proporcionar una experiencia de usuario más dinámica y veloz en aplicaciones web.

En conjunto, la integración de la conectividad y la eficiencia del sistema se logra a través de la metodología *Internet de las Cosas* (IoT). Esta estrategia garantiza una comunicación fluida entre los dispositivos y el servidor, lo que es esencial para el éxito del proyecto. Gracias a la tecnología IoT, se establece una sinergia que permite que los dispositivos envíen datos de forma eficaz y que el servidor responda de manera oportuna, facilitando así la gestión remota de la información y la toma de decisiones basadas en datos en tiempo real.

4. RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir del proceso de aprendizaje, así como las detecciones realizadas en un entorno de aplicación real. Además, se describe la plataforma web de visualización que genera alarmas de manera instantánea en respuesta a las detecciones.

4.1 Resultado del entrenamiento

En la Tabla 2, se proporciona un resumen de los parámetros obtenidos durante el entrenamiento del modelo YOLO. Estos parámetros son de gran importancia y se utilizarán para evaluar el rendimiento del modelo en la detección de armas de fuego en el sistema implementado.

Tabla 2. Parámetros obtenidos del entrenamiento del modelo YOLO

Parámetro	Valor
mAP_50	0.98271
Precisión	0.96328
mAP_95	0.84265
Factor de confianza	0.462

Con el fin de evaluar el desempeño del modelo neuronal y garantizar que cumple con los estándares de calidad establecidos, se ha optado por emplear la métrica de precisión promedio (mAP) como el indicador central de evaluación. La mAP se convierte en una herramienta esencial para valorar de manera global la precisión del modelo en la detección de objetos, brindando una medición exhaustiva de su capacidad de ejecución.

Adicionalmente, se recurre a la representación gráfica de la curva F1 (ver Figura 7), la cual proporciona una visión integral del equilibrio entre la precisión y la sensibilidad del sistema. El análisis de esta curva muestra con precisión el punto de equilibrio correspondiente a un nivel específico de confianza, donde tanto la precisión como la sensibilidad alcanzan su nivel óptimo. Este punto de equilibrio adquiere un rol crítico al determinar el umbral idóneo en la toma de decisiones del sistema.

La precisión y la sensibilidad son componentes esenciales en la evaluación de la efectividad del modelo y su capacidad de detección. Por lo tanto, la selección del factor de confianza exacto, marcado como "0.462", se fundamentará en los resultados particulares obtenidos durante el estudio.

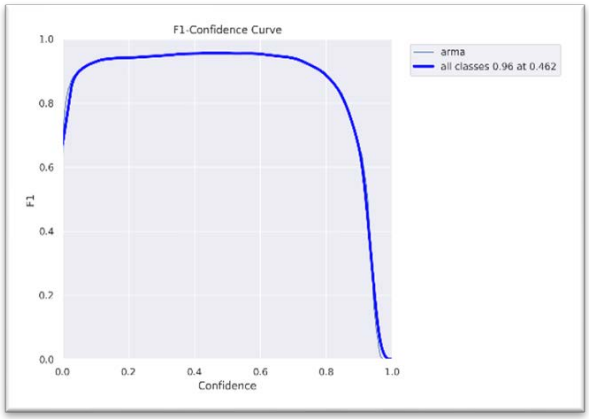


Figura 7. Curva de comportamiento para el parámetro F1-Factor de confianza

Por último, en la Figura 8 se presentan una serie de imágenes en las que se aplicó el modelo con el propósito de realizar predicciones, sirviendo así como un proceso de validación. Este proceso representa una parte esencial de la evaluación del modelo, proporcionando una representación visual de cómo se comporta en condiciones reales y cómo responde a diferentes escenarios de detección.

ISSN: 2992-8338

Figura 8. Predicciones realizadas - imágenes de validación

4.2 Interfaz gráfica web

Finalmente, se presenta la interfaz gráfica diseñada para la visualización en tiempo real de las alertas generadas por el sistema. La interfaz consta de dos secciones claramente definidas.

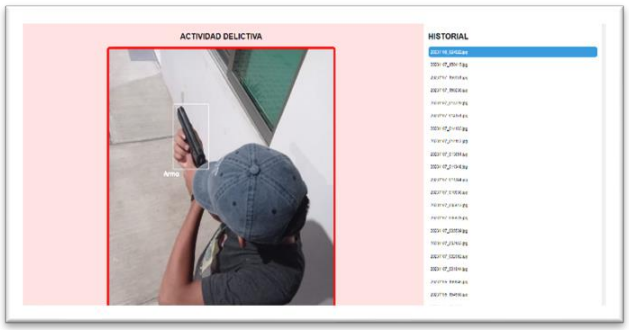


Figura 9. Interfaz gráfica web para la aplicación

En el lado izquierdo, se encuentra un área específica que exhibe las detecciones recientes realizadas en tiempo real. Cada vez que el modelo detecta la presencia de un arma en la escena bajo vigilancia, la imagen de la escena se transmite y la página web genera una alerta de dos maneras distintas. La primera forma de alerta es visual, donde la página cambia su color de fondo, parpadeando en rojo para indicar la detección. La segunda forma de alerta es auditiva, con la emisión de un sonido que informa que se ha realizado una nueva detección.

En el lado derecho, se dispone de una sección que muestra un historial de las detecciones registradas por el servidor. Las entradas se presentan en orden descendente, con la entrada más reciente en la parte superior. Cabe destacar que el nombre de cada entrada incluye la fecha y la hora de la detección, permitiendo una referencia temporal precisa. Esta interfaz proporciona una herramienta efectiva para el monitoreo continuo y la gestión de las detecciones en tiempo real, mejorando así la capacidad de respuesta ante situaciones críticas.

5. CONCLUSIONES

En resumen, el sistema desarrollado en este estudio se desglosa en dos etapas cruciales. La primera fase se enfocó en la creación de un modelo neuronal capaz de detectar armas de fuego. Los resultados obtenidos indicaron que la elección de un umbral de confianza de 0.462 proporciona un equilibrio óptimo entre la precisión de las predicciones y la sensibilidad del sistema en sus respuestas. La evaluación del rendimiento del modelo se realizó mediante la métrica mAP, arrojando un valor de 0.98271 con un umbral de confianza de 0.5, lo cual se considera aceptable para la detección de predicciones positivas. En la segunda etapa, se implementó la tecnología IoT para dotar al sistema de la capacidad de transmitir datos de forma remota a un servidor centralizado. La interfaz web presentada en el capítulo 4 demostró su eficacia y dinamismo al notificar al personal encargado del monitoreo mediante la emisión de alarmas auditivas y visuales. En conjunto, este sistema representa una herramienta de gran importancia que contribuye significativamente a la mitigación de actividades delictivas. Destaca especialmente su capacidad para reducir los tiempos de respuesta de las autoridades responsables de la seguridad, fortaleciendo así la seguridad en la escena bajo vigilancia.

REFERENCIAS

Castillo, A., Tabik, S., Pérez, F., Olmos, R., & Herrera, F. (2019). Brightness guided preprocessing for automatic cold steel weapon detection in surveillance videos with deep learning. Neurocomputing, 330, 151-161.

Jones, E., Tanveer, A. J., Ohakim, C., Castillo, J. M., Kothari, K., & Muthukumar, S. (2021). Utilizing Internet of things [IOT] Technologies to prevent Mass gun related Shootings. International Supply Chain Technology Journal, 7(10).

Mehta, P., Kumar, A., & Bhattacharjee, S. (2020, July). Fire and gun violence-based anomaly detection system using deep neural networks. In 2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC) (pp. 199-204). IEEE.

Chatterjee, R., Chatterjee, A., Pradhan, M. R., Acharya, B., & Choudhury, T. (2023). A Deep Learning-based Efficient Firearms Monitoring Technique for Building Secure Smart Cities. IEEE Access.

Welsh, D., Faridee, A. Z. M., & Roy, N. (2021, March). Hybrid Distance-Based Framework for Classification of Embedded Firearm Recoil Data. In 2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops) (pp. 50-55). IEEE.

Broadway, K. (2022). Sensorized Warfighter Weapon Platforms: IoT Making the Fog of War Obsolete. IoT for Defense and National Security, 23-38.

ISSN: 2992-8338

Unmanned Aircraft Wing Analysis and Selection

A. Corona Arcila*, L.A. Jiménez Ponce*, K.Y. Galindo Flores*, K.A. Cruz Martínez*, J.A. Ramayo Pacheco*, A. Escamilla Santos*, M.E. Andrade Sánchez*, D.E. Constantino Recillas*

**Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx. (Tel:5571837459; e-mail: coaa201920076@tese.edu.mx , lajimenezp@tese.edu.mx , qafk201920310@tese.edu.mx, 201911005@tese.edu.mx, 201910097@tese.edu.mx , 202021949@tese.edu.mx , mandrades@tese.edu.mx , DanieCR@tese.edu.mx).*

Abstract: In aircraft design, the design and selection of wing geometries is a critical step. The wings are evaluated considering factors such as payload, maximum take-off weight, flight speed, and atmospheric conditions. The methodology is based on performing low-cost aerodynamic analyses of different wings, with the purpose of selecting the ones that deliver the best results based on aerodynamic parameters such as lift and drag coefficients, and fundamental operating parameters such as take-off distance, this being one of the most important criteria within the methodology to select the wing for the aircraft fulfilling their mission profile. Performing the analyses in software of the free panel method "XFLR5", widely recognized in the field, allowing reliable analyses in the range of Mach Number and Reynolds Number of the studied problem, with a low computational cost, thus allowing to widely explore the search space of the problem in a moderate time.

Keywords: Analysis, CFD, XFLR5, Wing, UAV.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de una aeronave es una tarea compleja, este trabajo trata sobre el diseño conceptual y preliminar de una aeronave no tripulada bajo la reglamentación de la competencia SAE Aerodesign México, para la edición 2023.

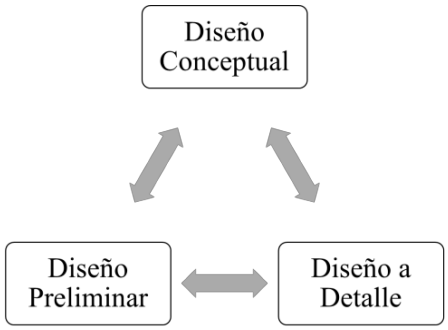


Figura 1. Etapas de Diseño.

Para el éxito en el diseño de una aeronave, la correcta selección y diseño del ala es de gran importancia, dicho componente desempeña un papel crucial en el vuelo por diversas razones:

• **Levantamiento y Arrastre Aerodinámico:** El ala al estar inmersa en el flujo de aire, genera una fuerza denominada resultante aerodinámica, que tiene una componente perpendicular al viento relativo llamada levantamiento, que, en condiciones normales, es la que permite el vuelo de la aeronave al contrarrestar el peso de la misma. También se genera una fuerza paralela y en la misma dirección de la corriente de viento que se denomina Arrastre, la cual debe ser vencida o equilibrada con el empuje proporcionado por el sistema de propulsión instalado. Los parámetros geométricos del ala afectan directamente estas características aerodinámicas.

• **Estabilidad:** Gran parte de la estabilidad de una aeronave reside en el correcto diseño del ala, y de su posición con respecto al fuselaje, pues el tamaño y la ubicación del Centro de Gravedad de la aeronave, así como el centro de levantamiento contribuyen a mantener el equilibrio y la estabilidad durante diferentes fases del vuelo.

• **Control:** El ala, tiene los alerones en los extremos, lo que permite a la aeronave realizar el movimiento de control llamado alabeo alrededor de su eje longitudinal, por ello, estas superficies se colocan cerca de las puntas del ala en la parte del borde de salida. Su tamaño y forma afectan la capacidad de viraje de la aeronave.

Los parámetros de control para el cumplimiento del perfil de misión a considerar son los siguientes:

- Perfil aerodinámico.
- Porcentaje de ala recta.
- Factor de carga.
- Superficie alar.
- Cuerda de raíz.
- Cuerda de punta.
- Conicidad.

ISSN: 2992-8338

Con el surgimiento de computadoras modernas de alta velocidad en las últimas décadas, se ha logrado realizar avances significativos en diferentes áreas y disciplinas de la ciencia. Ejemplo de ello se encuentra en la solución de problemas en aerodinámica, dando lugar a una nueva disciplina, la dinámica de fluidos computacional (DFC). Estas, a través de softwares especializados, simulan el comportamiento del aire alrededor de un sólido, haciendo más accesible, y barata la experimentación.

Usando estas computadoras y softwares especializados es posible el análisis aerodinámico para los diferentes componentes de la aeronave en un tiempo moderado, permitiendo probar muchas posibles configuraciones para seleccionar la que cumpla con el parámetro operativo de distancia de despegue, y si hubiera muchas posibles soluciones se usarían softwares de simulación más precisos como métodos de volúmenes finitos con algún modelo de turbulencia acoplado para obtener datos aerodinámicos más apegados a la realidad.

La finalidad de este proyecto es el análisis y la selección del ala para una aeronave no tripulada empleando la dinámica de fluidos computacional (DFC) con un método de paneles y posteriormente software de elemento finito. Cumpliendo con los requisitos necesarios para ser eficiente con base al perfil de misión estipulado.

2. METAS DE DISEÑO DEL ALA

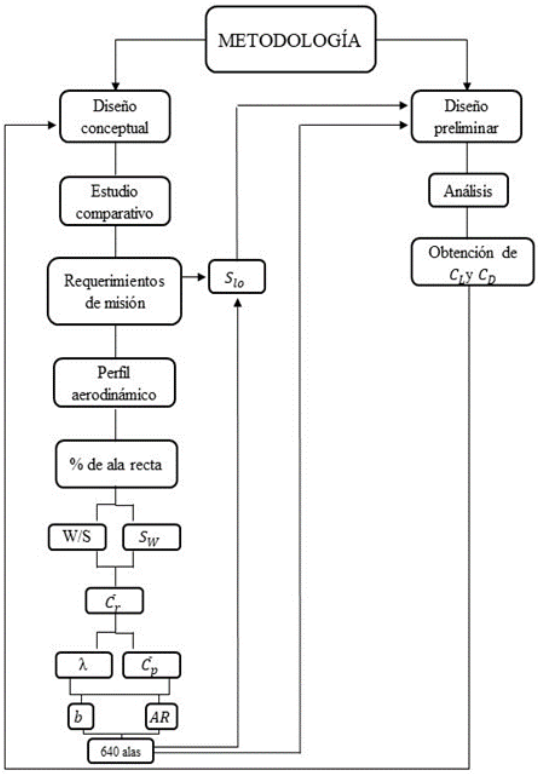


Figura 2. Metodología.

Se contemplaron una serie de metas de diseño en favor del cumplimiento del perfil de misión:
•Ala capaz de despegar en una distancia igual o menor a 30m con carga liquida.
•Ala capaz de despegar en una distancia igual o menor de 60m con carga sólida.
•Ala capaz de realizar aterrizaje en una distancia igual o menor a 120m.

3. METODOLOGÍA

Se empleó una metodología repartida en dos etapas: diseño conceptual que consta del estudio comparativo, requerimientos de misión, perfil aerodinámico, porcentaje de ala recta, factor de carga, superficie alar, cuerda de raíz, así como conicidad y diseño preliminar, que consiste en el análisis, y obtención de los coeficientes aerodinámicos.

3.1 Diseño conceptual

3.1.1 Estudio comparativo

Es conveniente hacer un análisis de geometrías, dimensiones y rendimientos de las aeronaves que existen en el mercado, asegurando que los parámetros de diseño sean competitivos con las demás opciones disponibles en el mercado.

3.1.2 Requerimientos de misión

El estudio comparativo, la reglamentación de la competencia SAE Aerodesign México, así como los datos estadísticos obtenidos del libro "Fundamentos da engenharia aeronáutica aplicações ao projeto SAE-Aerodesign" de Miranda, nos permiten establecer parámetros mínimos y esperados para aeronaves con misión similar. Se usan estos parámetros para inicio del diseño.
Para esta aeronave se precisa de un ala con las características mostradas en la tabla:

Requerimientos de misión	Especificaciones
Tipo de aeronave	Ala fija
MTOW	15 [kg]
Distancia de despegue en vacío	60 [m]
Distancia de despegue en sólido	60 [m]
Distancia de despegue en líquido	30 [m]
Distancia de aterrizaje	120 [m]

Tabla 1. Requerimientos de misión

3.1.3 Selección de perfil aerodinámico

Al seleccionar el perfil aerodinámico se tomaron en consideración los datos mostrados en la tabla 1, los cuales indicaban que la categoría de la aeronave es de tipo carguera y de baja velocidad, por lo que se necesitan perfiles aerodinámicos que muestren buen desempeño a bajos número de Reynolds, obteniendo alto C_L y bajo C_D, además de proporcionar condiciones suficientes de levantamiento por su gran combadura. Se propusieron 4 perfiles aerodinámicos que cumplen con dichas características. Se usó el libro "Theory of

ISSN: 2992-8338

wing sections; including a summary of airfoil data." como apoyo para encontrar los perfiles con un rango de operación de 400,000 a 600,000 Reynolds, para posteriormente analizar los perfiles con un número intermedio entre el rango obtenido. Se contemplaron los principales coeficientes aerodinámicos para seleccionar el que mejor se ajuste al perfil de misión.
Los análisis de los perfiles se realizaron empleando XFLR5, un software de acceso libre, mediante el cual se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos principales. Los resultados se muestran a continuación:

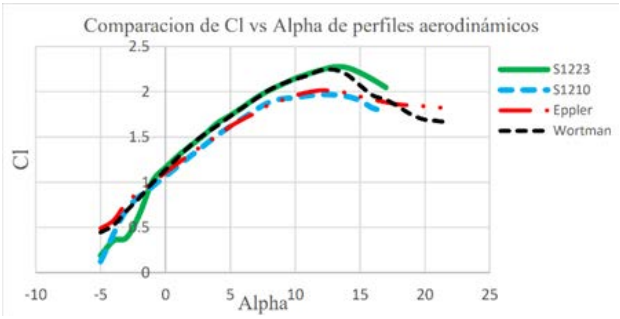


Figura 3. Gráfica de comparación de perfiles aerodinámicos. Cl vs Alpha.

3.1.4 Otras variables de diseño

Superficie alar: Para poder obtener la superficie alar es necesario hacer uso de la siguiente fórmula:

$$S_W = \frac{MTOW}{\frac{W}{S}}$$

Donde: **MTOW** es el peso máximo de despegue, y $\frac{W}{S}$ es el factor de carga.
Se realizó una variación del factor de carga en un rango de 9 a 16 kg/m^2, típico para estas aeronaves, y haciendo uso del peso máximo de despegue con un valor de 15 kg.

$MTOW_{(kg)}$	$W/S_{(kg/m^2)}$	$S_{w(m^2)}$
15	9	1.60
	10	1.50
	11	1.36
	12	1.25
	13	1.15
	14	1.07
	15	1.00
	16	0.93

Tabla 2. Variables de carga alar

3.1.5 Variables de diseño propuestas

Se propusieron valores para 3 criterios de diseño, los cuales fueron considerados en función de obtener diferentes soluciones de alas, para posteriormente ser analizadas.

Variables de diseño	Valor
Porcentaje de ala recta	40%
	50%
	60%
	70%
Cuerda de raíz	0.5 m
	0.55 m
	0.6 m
	0.65 m
	0.7 m
Conicidad	0.4
	0.5
	0.6
	0.7

Tabla 3. Variables de diseño

3.2 Diseño preliminar

3.2.1 Análisis

Para poder continuar con el proceso de diseño, en la etapa de diseño preliminar, se hizo uso del programa de acceso libre "XFLR5", el cual es utilizado como herramienta de análisis para perfiles aerodinámicos, alas y aviones que operan con números de Reynolds bajos y dentro de condiciones de flujo incompresible, es decir número de mach subsónico. Su capacidad de análisis está basada en el método de paneles, que en lugar de discretizar el dominio en una malla 3D, divide la superficie del objeto en una serie de paneles o elementos en 2D, haciendo posible la resolución de problemas no tan complejos, y a su vez, permitiendo análisis de bajo costo computacional y menor tiempo de análisis en comparación con los métodos más sofisticados como Volumen Finito. Los resultados de estos análisis son principalmente precisos en la zona lineal de las curvas de comportamiento de CL vs Alfa, es decir, valores moderados de ángulo de ataque.
Para las alas se analizó una superficie de elevación haciendo uso de la teoría de línea de elevación no lineal.

3.2.2 Condiciones de frontera

Las condiciones a las que fueron expuestas las alas a analizar en XFLR5 se muestran en la siguiente tabla:

ISSN: 2992-8338

Condiciones	Valor
Velocidad [m/s]	13
Densidad [kg/m^3]	1.22
Viscosidad cinemática [m^2/s]	$1.5x10^{-5}$
Temperatura [K]	288.15
Presión [Pa]	101325

Tabla 4. Condiciones de frontera

Dichos valores, con excepción de la velocidad, fueron tomados como referencia a la atmósfera estándar, específicamente al nivel del mar. La velocidad fue tomada como 13 m/s, pues es la velocidad promedio a la que operan este tipo de aeronaves.

3.3 Resultados preliminares

Una vez realizado el proceso de los análisis, se obtuvieron 640 alas con sus respectivos principales coeficientes aerodinámicos, de las cuales 638 alas fueron descartadas, obteniendo solo 2 resultados que cumplían con los valores de los requerimientos de misión establecidos. El proceso fue el siguiente: a través de la obtención de los coeficientes aerodinámicos de las 640 alas, se obtuvo la carrera de despegue de cada una de esas alas a través de la siguiente ecuación:

$$S_{lo} = \frac{1.44 \cdot W^2}{g \cdot \rho \cdot S \cdot C_{Lmáx} \cdot (T - (D + \mu \cdot (W - L)))}$$

Las alas que obtuvieron los mejores resultados en cuanto a C_L, C_D y la carrera de despegue fueron:

Ala	Perfil Aerodinámico	% de ala recta	Sw [m]	AR	b [m]	Slo [m]
409	S1223	60%	1.25	4.49	2.37	30.06
90	S1223	40%	1.25	4.79	2.45	29.79

Tabla 5. Mejores resultados

4. RESULTADOS FINALES

Revisando las 2 mejores opciones de las 640 alas analizadas, se determinó que el ala número 90, con un perfil S1223, con 40% de ala recta, una superficie alar de 1.25m, una envergadura de 2.45m y una distancia de pista de despegue de 29.79m es la que cumple con los requisitos de misión.

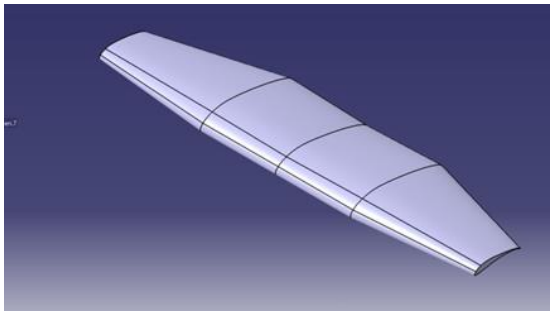


Figura 4. Diseño de ala seleccionado.

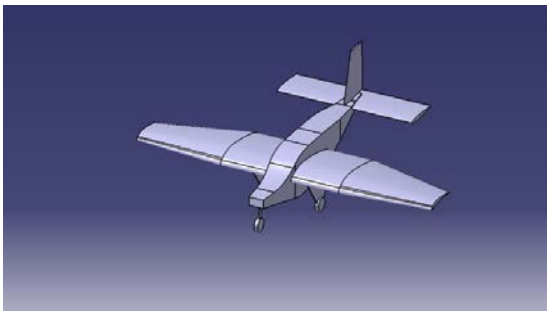


Figura 5. Diseño completo de la aeronave

5. CONCLUSIONES

El software XFLR5, con el método de paneles, ofrece un enfoque completo y seguro para que los diseñadores de aeronaves seleccionen el ala que más se adecúe a los requisitos de una aeronave no tripulada durante las primeras etapas de diseño. Además, el ala seleccionada se puede optimizar mediante herramientas con una mayor fidelidad, garantizando su rendimiento. Asimismo, el proceso llevado a cabo para el diseño del ala fue satisfactorio, ya que cumple con los requisitos establecidos por los requerimientos de la misión.

Fue construida y operada con éxito en una aeronave carguera que participó en la competencia SAE Aerodesign México 2023, donde obtuvo el 2do lugar de la competencia, de carácter

REFERENCIAS

Abbott, I. H., & Von Doenhoff, A. E. (2012). Theory of wing sections: including a summary of airfoil data. Courier Corporation.

Anderson, J. D., Degrez, G., Dick, E., & Grundmann, R. (2013). Computational fluid dynamics: an introduction. Springer Science & Business Media.

Fernández-Peña Mollá, L. (2012). XFLR5 V4. 17 software de análisis de perfiles, planos y aviones: estudio y diseño de un CN-235 (Bachelor's thesis).

Miranda, L. (2010). Fundamentos da engenharia aeronáutica aplicações ao projeto SAE-Aerodesign. São Paulo.

ISSN: 2992-8338

Thang, N. T., Hai, D. N., & Viet, T. K. (2017). Simulation of the steady flow around a flying wing by using inviscid and viscous incompressible flow models. In 10th Vietnam National Congress on Mechanics. **http://www.xflr5.tech/xflr5.htm**

ISSN: 2992-8338

Application of Neural Networks for the Selection and Design of Aerodynamic Profile for General Aviation Aircraft

Axel Gómez Munive*, Luis A. Jiménez Ponce*, Daniel E. Constantino Recillas*, Martín E. Andrade Sánchez*

**Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec Av. Tecnológico S/N Col. Valle de Anáhuac, sección Fuentes, 55210 Ecatepec de Morelos (Tel. 52+ 55-71-83-74-59, E-mail: rossguise5259@gmail.com, lajimenezp@tese.edu.mx, daniecr@tese.edu.mx, mandrades@tese.edu.mx)*

Abstract: This study explores the use of neural networks as an alternative tool for the generation and selection of aerodynamic profile geometries for aircraft. The aim is to reduce the research costs involved in generating new profiles and to create a greater diversity of less explored solutions for new geometries that can be subjected to Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis through panel or finite element methods to analyze their aerodynamic characteristics and compare them with the known reference geometries.

Keyword: Airfoil, Python, Neural networks, Backpropagation, CFD, TensorFlow, Hyperparameters

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de perfiles aerodinámicos en la historia de la aviación se ha basado en la comprensión profunda de sus principios fundamentales. En 1799 el inglés Sir George Cayley realizó investigaciones y observaciones del vuelo de las aves, logró identificar y comprender el principio de la aerodinámica que permiten a las aves volar. Analizando la forma de las alas su distribución de peso y control de vuelo logró aplicarlos a sus prototipos sentando las bases de los principios de sustentación (fuerza aerodinámica que permite a un objeto perpendicular al fujo de aire elevarse) y resistencia al aire que influye en un ala curvada generando una fuerza ascendente.

Durante 1891 Otto Lilienthal realizó su primer vuelo exitoso con un planeador con perfiles desarrollados por el mismo, siendo un gran avance en la aviación y desarrollo de los perfiles aerodinámicos ya que a diferencia de George Cayley logró el primer vuelo controlado y sostenido en una máquina más pesada que el aire.

Lilienthal a medida que avanzaba en su investigación en la geometría de perfiles curvados mejoraba la eficiencia aerodinámica y sustentación de sus prototipos, fue capaz de reconocer la importancia del ángulo de ataque y de las características geométricas para generar sustentación y estabilidad de vuelo, sus diseños permitieron generar perfiles con mejores prestaciones aún en diferentes condiciones de vuelo lo que resultó fundamental para los avances posteriores en el diseño de aeronaves y generar una comprensión más clara de los principios básicos de la aerodinámica.

A principios del siglo XX los hermanos Wilbur y Orville Wright lograron manufacturar su propio concepto de aeronave autopropulsada con una plataforma motriz lo suficientemente compacta ligera y potente para logar despegar, para esto se llevaron a cabo anteriormente una gran cantidad de estudios y experimentaciones con diferentes geometrías de perfiles aerodinámicos. Construyeron su propia versión de túnel de viento accionado por un motor eléctrico acoplado a un ventilador mediante una correa el cual generaba un flujo constante de viento el cual es crucial para observar el comportamiento de los perfiles aerodinámicos a diferentes ángulos de ataque.

Los hermanos Wright sometieron a más de 200 perfiles con diferentes características en su túnel de viento para observar que geometría era la que mejor se adaptaba a sus necesidades generando una de las primeras bases de datos de perfiles aerodinámicos.

En 1912 se fundó el Instituto Alemán de Investigación en Aeronáutica (DVL, por sus siglas en alemán) fue la organización enfocada en la investigación y desarrollo aeroespacial en Alemania, aunque la información sobre desarrollo de perfiles aerodinámicos es muy escasa lo cierto es que los avances del DVL colocaron a Alemania en la vanguardia en la investigación aerodinámica y en diseño de aeronaves durante la primera y segunda guerra mundial haciendo uso de sus avanzados túneles de viento haciendo pruebas aerodinámicas exhaustivas para evaluar el rendimiento de aeronaves militares logrando desarrollar geometrías altamente eficientes y avanzadas tecnológicamente desde un punto de vista aerodinámico.

Por otra parte, en 1921 Estados Unidos crearía el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (NACA, por sus siglas en ingles). Esta organización se enfocó en la investigación y diseño de perfiles aerodinámicos para aeronaves desarrollando las geometrías de la serie NACA el cual se convertiría en un estándar para la época e incluso para hoy en día.

El NACA realizó arduas y detalladas investigaciones del comportamiento de las geometrías aerodinámicas en diversas

ISSN: 2992-8338

condiciones de vuelo resultando en una comprensión más detallada de las variantes que afectan la eficiencia y rendimiento aerodinámico de las alas de las aeronaves, se desarrollaron y perfeccionaron las metodologías de análisis y pruebas para una mejor comprensión del comportamiento del fujo de aire alrededor de las superficies, lo que permitió un diseño más preciso y eficiente en la geometrías de las aeronaves.

Más tarde el NACA publicaría una gran cantidad de informes y documentación derivado de sus estudios permitiendo que la comunidad científica aeroespacial se beneficiara de los descubrimientos y avances en el campo del diseño de perfiles aerodinámicos. Estos avances sentarían las bases en la investigación y diseño aerodinámico moderno, siendo de gran relevancia actualmente en el diseño de aeronaves.

Actualmente existe un enfoque para la parametrización de perfiles aerodinámicos con métodos como el llamado PARSEC o sección paramétrica o el CST de *Kulfan*, estos permiten ajustar y modificar las secciones de manera controlada de la geometría del perfil aerodinámico optimizando su rendimiento según se necesite en el diseño de la aeronave. Estos parámetros permiten ajustar y controlar los ajustes que permiten cambiar el espesor máximo, la curvatura del intradós (parte inferir del ala) y extradós (parte superior del ala), entre otros.

Al utilizarlos se puede explorar un amplio espectro de geometrías posibles permitiendo comprender mejor cómo afectan las diferentes formas el comportamiento aerodinámico de una aeronave, convirtiéndolo en una herramienta importante para el diseño de aeronaves permitiendo un enfoque más detallado y controlado en la parametrización de las secciones aerodinámicos con menor tiempo de desarrollo, más automatización y precisión además de menor costo en tiempo con el uso de computadoras modernas.

Dentro del campo de la inteligencia artificial las redes neuronales gozan de gran popularidad actualmente. Sus bases se remontan desde 1943 en donde Warren McCulloch y Walter Pitts propusieron un modelo matemático de una neurona fabricando un circuito eléctrico de su funcionamiento.

En 1957 el psicólogo Frank Rosenblatt desarrollaría un algoritmo de aprendizaje supervisado para clasificadores binarios al cual le daría el nombre de perceptrón, inspirado en una neurona del cerebro y su capacidad de tomar decisiones lo que sentaría las bases para el desarrollo futuro de las redes neuronales.

Para la década de 1960 Bernard *Widrow* y *Marcian Hoff* desarrollaron la Neurona lineal adaptativa "*Adaline*" siendo esta la precursora del perceptrón y uno de los primeros modelos de redes neuronales siendo utilizada en la filtración de ruido en las líneas de comunicación.

Con los avances en la computación hubo posibilidad de generar grandes conjuntos de datos para desarrollo de arquitecturas más complejas, como las redes neuronales profundas, las cuales cuentan un número mayor de capas entre la entrada y salida de datos demostrando ser efectivas en una gran variedad de aplicaciones como el reconocimiento de patrones en conjuntos de datos complejos.

En 1974, el científico Paul desarrolló del algoritmo de retro propagación (*backpropagation*). Es una técnica de entrenamiento para ajustar los pesos entre las conexiones de las neuronas en función del error al ajustar los pesos de la red, esto implica propagar el error desde la capa de salida hasta la capa de entrada calculando los gradientes de error con respecto a los pesos de las conexiones minimizando el error.

Este algoritmo es crucial para el entrenamiento de las redes neuronales profundas las cuales están compuestas por múltiples capas ocultas, estas son esenciales para la extracción de características y la representación de la complejidad de los datos. Cada capa oculta consiste en un conjunto de neuronas que procesan la información recibida de la capa anterior y la pasan a la siguiente capa que permiten extraer características complejas y abstractas de los conjuntos de datos. Las redes neuronales profundas son ampliamente utilizadas para el reconocimiento de voz, imágenes y lenguaje natural haciéndolas valiosas en la solución de problemas con características y patrones difíciles de definir.

Con el uso de estas tecnologías como el aprendizaje automático se pueden reducir considerablemente los costos y el tiempo asociados con la selección y diseño de los perfiles aerodinámicos, y garantizar un mayor rendimiento y eficiencia en el diseño de las aeronaves.

La importancia del presente trabajo radica en la implementación de los últimos avances tecnológicos en los campos de la ingeniería y la programación para simplificar y agilizar uno de los aspectos fundamentales del proceso de desarrollo de aeronaves: la selección de perfiles aerodinámicos para las diversas secciones alares.

2. METODOLOGÍA.

Para este trabajo se tomó una red neuronal profunda previamente entrenada en el reconocimiento de patrones de imágenes modificando las entradas y salidas para que se ajuste a las necesidades de identificación de la geometría de perfiles requeridas.

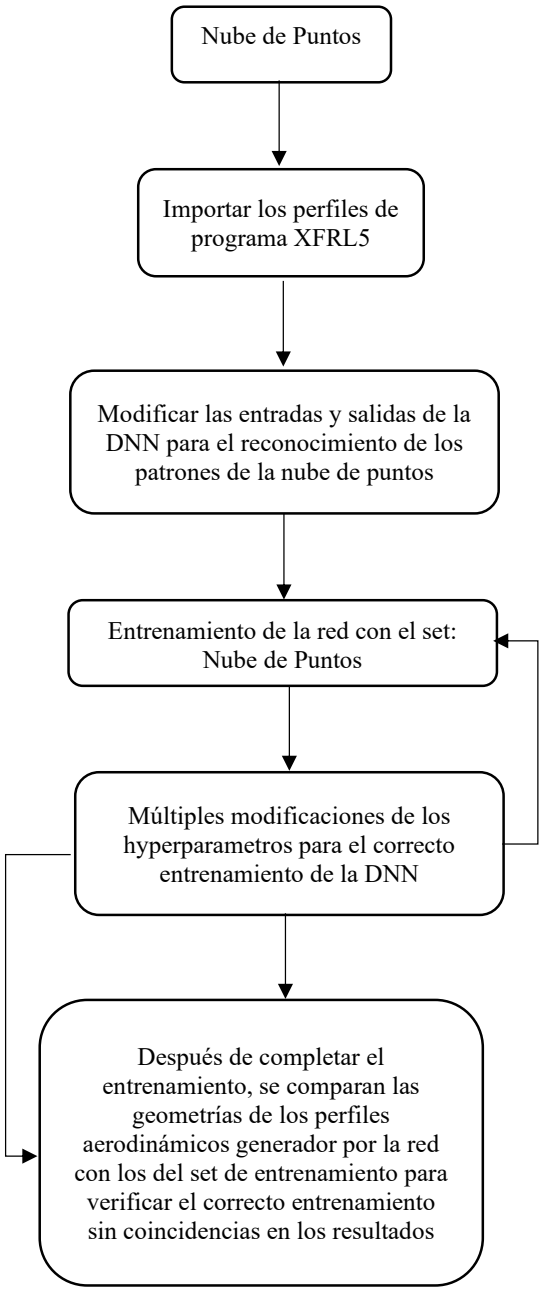
Para crear el conjunto de datos se utilizaron las coordenadas de los perfiles las cuales fueron obtenidas del programa XFLR5 el cual se especializa en análisis aerodinámicos mediante el método de paneles, cuenta con una biblioteca de perfiles NACA los cuales se utilizaron para obtener la nube de puntos de 95 perfiles, con los datos obtenidos se descargan y se importaron a una hoja de cálculo separándolos en coordenadas para su fácil reconocimiento en el código de programación.

Después de codificar las nubes de puntos a un formato que el código reconociera se procedió a generar el código utilizando el lenguaje de programación de Python en él se importarían las bibliotecas de Pandas, proporciona una estructura de datos en memoria en diferentes formatos en este caso para .xlsx, *TensorFlow* es una plataforma de código abierto utilizada para implementar algoritmos de aprendizaje automático y *Keras* es una biblioteca que proporciona una API para la creación de

ISSN: 2992-8338

redes neuronales. Se declaran las variables aerodinámicas que necesarios para extraer el set de datos, se ajustan los hyperparametros como la tasa de aprendizaje de pérdida, número de épocas y la división de validación utilizando un 80% para el entrenamiento y 20% para el conjunto de validación y conjunto de pruebas.

Con todos los hyperparametros ajustados se ejecutó el código generando una convergencia exitosa en la gráfica de pérdida / épocas, que nos habla de que los valores predichos por la red se ajustan a los esperados del set de datos para aprendizaje.



3.RESULTADOS.

Con la modificación de los *hyperparametros* de la red se logó que su tasa de aprendizaje y pérdida convergiese a los 140 ciclos en un lapso de 5 minutos de entrenamiento (Fig. 1.1) de igual manera en la gráfica de predicción de la DNN graficaba resultados muy parecidos al del conjunto de entrenamiento (Fig. 1.2)

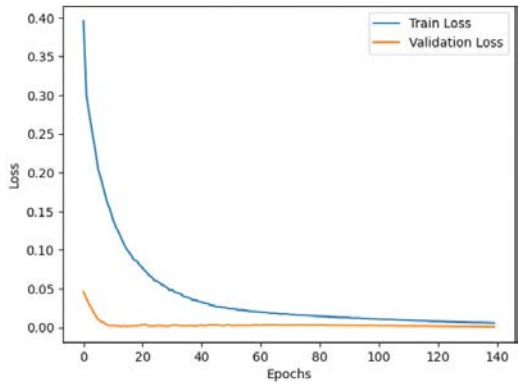


Figura 1.1 Grafica de aprendizaje

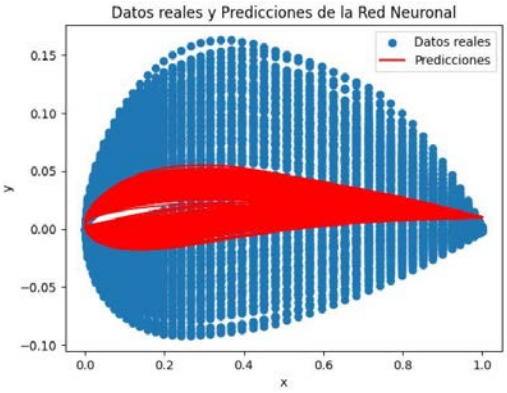


Figura 1.2 Gráfica de predicción de la DNN donde la geometría azul son los datos reales y la roja son las predicciones de la red

Importando los datos generados por la gráfica de predicción a una hoja de cálculo se puede observar que las coordenadas X, Y de los perfiles aerodinámicos son diferentes, esto refleja que la DNN realmente aprendió a generar nuevos perfiles, para estar seguro la prueba se repitió varias veces, como se puede observar (Fig. 1.3 y 1.4) los resultados arrojados por la gráfica demuestran geometrías de perfiles aerodinámicos distintos a los datos de entrenamiento, a primera vista los resultados parecen muy similares pero al separar las coordenadas de X, Y en bloques de 100 filas las diferencias son más evidentes.

ISSN: 2992-8338

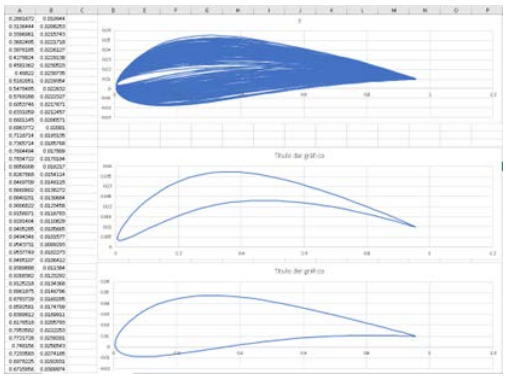


Fig.1.3 Primera corrida del código se observa que los primeros perfiles tienen una gran diferencia en la curvatura de intradós y extradós.

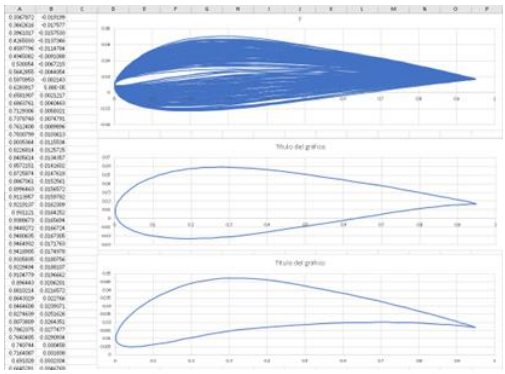


Fig. 1.4 Segunda corrida del código se aprecia que las características de los nuevos perfiles son diferentes en comparación a la Fig. 1.3 siendo la más notable la cuerda del perfil más larga y una curvatura menos pronunciada.

4.CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos indican claramente que la red se entrenó exitosamente logrando generar perfiles aerodinámicos de manera efectiva, demostrando que tuvo la capacidad de aprender patrones complejos y reproducir salidas precisas y coherentes a su entrenamiento.

Estos resultados confirman la capacidad de reducir significativamente el proceso de generación de nuevas geometrías aerodinámicas, aliviando la carga de trabajo y recursos asociados a la creación de nuevos perfiles aerodinámicos, ya que con este método permite generar y analizar decenas de miles de perfiles en días en comparación con las pruebas de tuéneles de viento o CFD que pueden tardar meses o años de pruebas.

5.TRABAJO A FUTURO.

Con las 3 compilaciones generadas por la red se obtuvieron un total de 261 perfiles con diferentes características, para corroborar si el rendimiento aerodinámico obtuvo una mejora considerable en las nuevas geometrías serán analizadas empleando un software de CFD de RANS o volumen finito.

REFERENCIAS

Ackroyd, JAD. "Sir George Cayley: La invención del avión cerca de Scarborough en la época de Trafalgar". Revista de Historia Aeronáutica, artículo n.º 6 (2011).

Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., y Arshad, H. "State-of-the-art in applications of artificial neural networks: A survey." Heliyón, vol. 4, no. 11, 2018.

Aggarwal, C. C. "Neural networks and deep learning." Springer, 2018, pp. 3-10.978.

Bilstein, R. E. "Órdenes de magnitud: una historia de la NACA y la NASA, 1915-1990." NASA, 1989.

Hopfield, John J., y Tank, David W. ""Neural" computation of decisions in optimization problems." Biological cybernetics 52.3 (1985): 141-152.

Lamont, Ann. "Los hermanos Wright: pioneros de la aviación." Revista Creation 13.4 (1991): 24-27.

Lilienthal, Otto. "Der vogelflug als grundlage der fliegekunst." Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2019.

Matich, Damián Jorge. "Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones." Universidad Tecnológica Nacional, México 41 (2001): 12-16.

Parametrización Geométrica y Optimización Aerodinámica de Alas en Flujo Transónico vol.1 ESIME Ticomán, 2017.

Roldán, Álex. Investigación modelo: Comité Asesor Nacional de Aeronáutica, 1915-1958. vol. 1. Subdivisión de Información Científica y Técnica, Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, 1985.

Rosenblatt, Frank. Principios de la neuro dinámica. perceptrones y la teoría de los mecanismos cerebrales. Cornell Aeronautical Lab Inc Buffalo NY, 1961.

Santos-Dumont, Alberto, et al. Alberto Santos-Dumont. Atlantic Presse-Photo, 1930.

ISSN: 2992-8338

Valuation of urban solid waste in the State of Morelos

A.-R. Guadarrama-Estrada*, **G.-L. Osorio-Gordillo***, **R.-A. Vargas Méndez***, **C.M. Astorga-Zaragoza***, **J. Reyes-Reyes***

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*
e-mail: d19ce018@cenidet.tecnm.mx

Abstract. This article begins by exploring the composition of urban solid waste and examining the current disposal sites in the region. Through this analysis, future complications arising from demographic growth and inadequate management of urban solid waste are anticipated. Subsequently, a concrete proposal is presented for the valorization of these wastes, with the purpose of improving the quality of life of the population of the state of Morelos. These solutions are designed to address the challenges associated with the increase in waste generation in a context of population growth, promoting sustainable practices and contributing to the preservation of the environmental surroundings, towards a more sustainable future and the improvement of the quality of life of the inhabitants of Morelos.

Keywords: Municipal solid waste, Special handling waste, Hazardous waste, Sustainable, Integrated management.

1. INTRODUCCIÓN

El primer paso crítico en la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es obtener un conocimiento sólido de su origen y composición. A partir de esta comprensión, se pueden formular estrategias y planes eficaces para su gestión apropiada.

La buena gestión de los RSU está ligada al desarrollo sostenible y sustentable, que implica la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. Para lograr que la gestión de residuos cumpla con esto, es necesario promover cambios en los patrones de consumo, producción y gestión. Además, es esencial establecer sistemas integrales de prevención, gestión y disposición de los RSU, incluyendo los de manejo especial y peligrosos [Bartra Gómez and Delgado Bardales (2020); Arce García et al. (2022)]. Estos sistemas deben ser ambientalmente sostenibles, técnicamente viables, económicamente factibles y socialmente aceptables.

En México, gran parte del sistema de manejo y aprovechamiento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) opera a través de una estructura informal, en gran medida sustentada por personas conocidas como "pepenadores", quienes recuperan materiales reciclables de los RSU con el fin de venderlos a intermediarios o centros de acopio locales [Aguilar-Vera (2019)]. No obstante, es importante subrayar que esta situación no presenta perspectivas de mejora en las condiciones de vida y laborales a corto y mediano plazo para el sector informal.

Según [Anne. and Michael. (2015)], es esencial comprender la dinámica entre los distintos protagonistas que participan en la generación y gestión RSU, tales como la sociedad, las autoridades gubernamentales y las empresas privadas. Estos agentes desempeñan un papel crucial en la promoción de mercados para materiales reciclados. Fomentar el desarrollo de mercados locales puede potenciar la valorización de los residuos a nivel regional y, al mismo tiempo, elevar la eficiencia de su gestión en su totalidad.

El enfoque en la gestión de residuos aumentó a nivel global después de la "Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD)", en Río de Janeiro, en 1992. Durante este encuentro, se establecieron acuerdos internacionales para la gestión adecuada de los residuos, los cuales quedaron plasmados en el documento conocido como "Agenda XXI", en el cual México se comprometió a implementar los principios y objetivos de la Agenda en sus políticas nacionales y acciones para promover el desarrollo sostenible en el país [Bartra Gómez and Delgado Bardales (2020)].

En México, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, específicamente en su artículo 115, concede a los municipios la competencia y las atribuciones para ofrecer servicios públicos relacionados con la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Sin embargo, en el estado de Morelos, la prestación deficiente de estos servicios, así como los problemas de corrupción y la contaminación del suelo y el agua, han resultado en intervenciones frecuentes por parte del Gobierno Estatal. En numerosas ocasiones, ha sido necesario remediar y clausurar vertederos a cielo abierto. Alarmantemente, en algunos casos, los municipios responsables han reincidido en el uso inapropiado de los sitios previamente remediados, lo que ha planteado serias amenazas al medio ambiente y la salud pública [SDS (2017); Nápoles (2019-2024)].

ISSN: 2992-8338

La contribución central de este artículo radica en visibilizar la problemática relacionada con la disposición final de los residuos sólidos urbanos en el estado de Morelos y el creciente desafío que se avecina debido al aumento de la población y la falta de planificación y seguimiento efectivos por parte del gobierno. No solo se presentará una crítica, sino que también se ofrecerán propuestas para una gestión adecuada de estos residuos.

2. RESIDUOS Y SU PROCEDENCIA

Los residuos, entendidos como cualquier sustancia, material, objeto o producto desechado debido a que ya no tiene utilidad para su poseedor original, constituyen un aspecto significativo en la gestión ambiental y la sostenibilidad de nuestras sociedades. La clasificación de estos residuos según su origen y características es fundamental para una gestión eficiente y segura de los mismos. En esta sección, exploraremos las tres principales categorías de residuos: los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), los Residuos de Manejo Especial (RME) y los Residuos Peligrosos (RP) [Arce García et al. (2022); Gobierno de México (2019)] Figura 1.

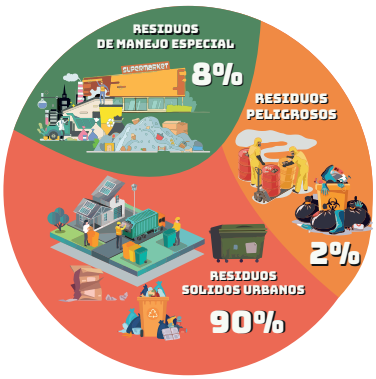


Figura 1. Clasificación de los residuos por su origen.

Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Los RSU, a menudo conocidos como basura doméstica, comprenden los residuos generados en hogares y comunidades. Incluyen materiales desechados en actividades cotidianas, como alimentos, envases, embalajes, productos de consumo y otros elementos que ya no son de utilidad para los usuarios originales. Además de los residuos domésticos, los RSU pueden provenir de actividades comerciales en la calle y operaciones de limpieza de calles y áreas públicas.

Residuos de Manejo Especial (RME)

Los RME son residuos generados en actividades comerciales e industriales que requieren un manejo y tratamiento especializado debido a su volumen, complejidad o necesidad de cumplir con regulaciones específicas. Este tipo de residuos puede abarcar diversas categorías, como residuos electrónicos, residuos de construcción y demolición, y otros desechos procedentes de establecimientos como supermercados, aeropuertos o centrales de autobús.

Aunque los RME no son necesariamente peligrosos por sí mismos, su manejo adecuado es esencial para evitar impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente. La aplicación de buenas prácticas en la gestión de estos residuos son cruciales para minimizar su impacto y maximizar la recuperación de materiales valiosos.

Residuos Peligrosos (RP)

Los RP son aquellos residuos que presentan características de peligrosidad, como corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o la presencia de agentes infecciosos. Esta categoría también incluye envases, recipientes, embalajes y suelos contaminados durante la transferencia a otro sitio.

La gestión de los RP es especialmente crítica debido a su capacidad para causar daño a la salud humana y al medio ambiente. Estos residuos deben ser tratados, almacenados y dispuestos de manera rigurosa y conforme a regulaciones específicas para minimizar riesgos (NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002).

3. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los RSU son una mezcla de diversos materiales desechados en entornos urbanos, y su composición puede variar significativamente de una región a otra, pero por lo regular la composición de los residuos sólidos está formado de la siguiente manera.

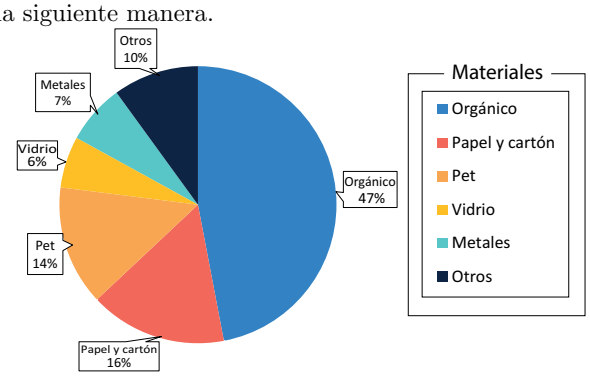


Figura 2. Componentes de los residuos (Elaborado con información propia generada en 2018).

Como se puede observar en la Figura 2 una de las partes más prominentes en los RSU es la materia orgánica, que abarca los restos de alimentos, papel de cocina y otros materiales biodegradables. Este componente representa en promedio alrededor del 47 % de los RSU. La gestión adecuada de la materia orgánica es crucial, ya que puede ser convertida en compost para su uso en la agricultura y jardinería, reduciendo así la necesidad de fertilizantes químicos que dañan el medio ambiente.

Otra parte importante en la composición de los RSU es el papel y cartón, que comprenden aproximadamente el 16 %. El reciclaje de papel y cartón no solo conserva recursos forestales, sino que también ahorra energía en la fabricación de nuevos productos de papel.

ISSN: 2992-8338

Los plásticos (pet), forman alrededor del 14 % de los RSU, siendo así otro aspecto crítico. La gestión adecuada de los plásticos es esencial para mitigar la contaminación ambiental y reducir la dependencia de la producción del plástico. El reciclaje de plásticos puede transformarlos en nuevos productos, contribuyendo a la economía circular.

El vidrio, que representa aproximadamente el 6 %, es altamente reciclable y su gestión adecuada reduce la demanda de materias primas y ahorra energía en la fabricación de vidrio nuevo.

Los metales, incluyendo latas de aluminio, envases metálicos y otros objetos de metal, representan otro 7 % de los RSU. El reciclaje de metales tiene beneficios económicos y ambientales significativos, ya que reduce la extracción de minerales y la emisión de gases de efecto invernadero.

Los elementos que integran la sección de otros 10 % son electrónicos desechados, baterías, lodos, madera y tela. Finalmente, podemos decir que comprender la composición de los RSU es fundamental para implementar estrategias de gestión de residuos efectivas, como el reciclaje y la valorización.

4. GENERACIÓN DE RESIDUOS EN MORELOS

El estado de Morelos, ubicado en la región central de México, comparte fronteras con la Ciudad de México y los estados de México, Guerrero y Puebla. A pesar de su modesta extensión de 5,000 km^2, equivalente al 0.2 % del territorio nacional, la región central del país alberga a una densa población de 30 millones de habitantes [Nápoles (2019-2024); SDS (2017)].

Actualmente, en Morelos se generan 2,171 toneladas de residuos al día [Nápoles (2019-2024)], a pesar de contar con una población de 1.972 millones de personas. Esta situación plantea una problemática creciente que requerirá medidas preventivas y correctivas para evitar complicaciones futuras. Por tanto, es esencial analizar detenidamente la gestión de los residuos sólidos urbanos en Morelos.

De acuerdo con datos proporcionados por la Secretaría de Desarrollo Sustentable, la gestión de residuos sólidos urbanos en Morelos se divide en seis regiones: Altos de Morelos, región centro sur, Cuernavaca norte, Cuernavaca sur, región oriente y región sur poniente. En la Figura 3, se muestra la generación diaria de residuos en toneladas, la región de Cuernavaca sur genera 411.6 toneladas al día, lo que representa el (25.51 %) del total estatal. La región de Cuernavaca norte contribuye con 484.58 toneladas al día (30.03 %), seguida de la región centro sur con 398.82 toneladas diarias (24.72 %). Las regiones de oriente, poniente y Altos de Morelos generan 80.94 (5.01 %), 118.82 (7.36 %) y 118.4 (7.33 %) toneladas diarias, respectivamente.

En la Tabla 4 se presenta la generación per cápita por municipio y región de residuos sólidos urbanos.

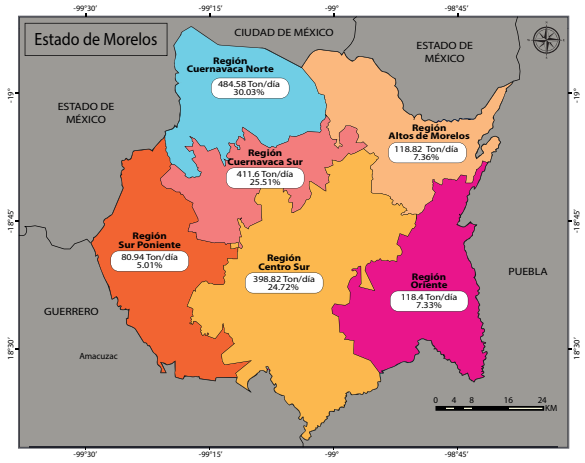


Figura 3. Regiones de Morelos.

Tabla 1. Generación de residuos

No	Municipio	Habitantes (2020)	Generación 2020 (ton/día)	Generación per cápita (kg*día/hab)
	Cuernavaca Norte			
1	Cuernavaca	378,476	400	1.55
2	Huitzilac	24,515	19.42	0.79
3	Tepoztlán	54,987	65.16	1.19
	Total	**457,978**	**484.58**	**1.06**
	Cuernavaca Sur			
1	Emiliano Zapata	107,053	108.6	1.01
2	Temixco	122,263	58	1.09
3	Jiutepec	215,357	140	1.47
4	Xochitepec	73,539	40	0.54
5	Yautepec	105,780	65	0.61
	Total	**623,992**	**411.6**	**0.66**
	Sur Poniente			
1	Amacuzac	17,598	10	0.65
2	Coatlán del Río	10,520	5.33	0.74
3	Mazatepec	9,653	8.68	0.85
4	Miacatlán	15,802	9.51	0.66
5	Coatetelco	11,347	4.4	0.47
6	Puente de Ixtla	40,018	37.8	0.76
7	Tetecala	7,617	5.22	0.76
	Total	**112,555**	**80.94**	**0.72**
	Centro Sur			
1	Ciudad Ayala	89,834	87.802	0.98
2	Cuautla	187,118	199.582	1.07
3	Xoxocotla	27,805	7	0.25
4	Jojutla	57,682	42.422	0.74
5	Tlaltizapán	52,399	18.529	0.35
6	Tlalquitenango	33,789	16.583	0.79
7	Zacatepec	36,094	26.901	0.75
	Total	**484,721**	**398.82**	**0.82**

ISSN: 2992-8338

Tabla 2. Generación de residuos

No	Municipio	Habitantes (2020)	Generación 2020 (ton/día)	Generación per cápita (kg*día/hab)
	Altos de Morelos			
1	Atlatlahucan	25,232	15.85	0.63
2	Ocuituco	19,219	9.67	0.5
3	Tetela del Volcán	14,853	7.49	0.5
4	Tlalnepantla	7,943	5	0.6
5	Tlayacapan	19,408	13	0.81
6	Totolapan	12,750	9.37	0.73
7	Yecapixtla	56,083	36.44	0.65
8	Hueyapan	7,855	4	0.51
	Total	**163,343**	**118.82**	**0.73**
	Oriente			
1	Axochiapan	39,174	64	2.04
2	Temoac	16,574	8.47	0.51
3	Tepalcingo	28,122	21.89	0.78
4	Jantetelco	18,402	10.2	0.63
5	Jonacatepec	16,694	8.76	0.53
6	Zacualpan	9,965	5.08	0.51
	Total	**128,931**	**118.4**	**0.92**

La incorrecta disposición final de los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, tiraderos a cielo abierto o sitios controlados representa un riesgo ambiental. Como consecuencia, estos lugares continúan siendo una preocupación ambiental significativa en el Estado de Morelos. Según los registros de los últimos 15 años, se han emprendido 39 acciones de remediación y clausura de pasivos ambientales relacionados con la inadecuada exposición o manejo de residuos sólidos urbanos.

En la Figura 4 se pueden observar los diversos sitios de disposición de residuos. Actualmente, en Morelos, 33 sitios están clausurados, y hay 9 rellenos sanitarios planificados, de los cuales varios no cumplen con los requisitos mínimos de operación o han excedido su capacidad inicial. Un caso especial es el relleno sanitario de Cuautla, conocido como "La Perseverancia", la cual utiliza tecnología para la captación de gases y sigue los procedimientos necesarios para operar correctamente.

En cuanto a las 4 plantas de valorización, todas han sido abandonadas y algunas vandalizadas. Se registran 6 tiraderos a cielo abierto que representan un desafío significativo para el estado, ya que carecen de regulación, supervisión y planificación ambiental. A pesar de esto, existen 2 centros de transferencia en funcionamiento que satisfacen las necesidades de la región Cuernavaca sur y norte.

5. PROYECCIÓN AL FUTURO

En esta sección, se abordará una proyección a futuro de la población y la generación de residuos sólidos urbanos en el estado de Morelos. Nuestro enfoque se basa en

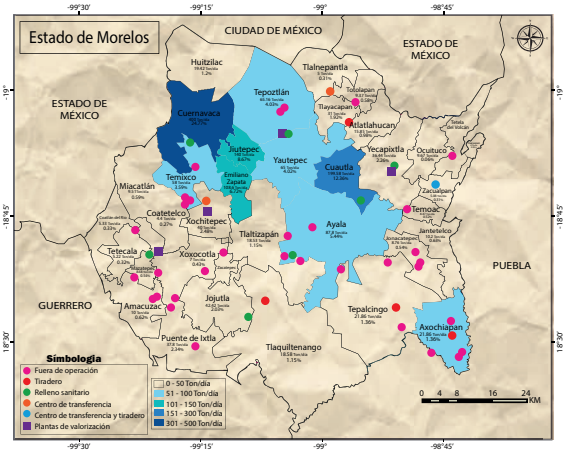


Figura 4. Lugares de disposición.

datos estadísticos recopilados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI (2022)] a partir del año 2009. Esta información no solo es esencial para comprender la dinámica demográfica y el impacto ambiental, sino que también nos permitirá desarrollar una estrategia más efectiva de gestión de residuos.

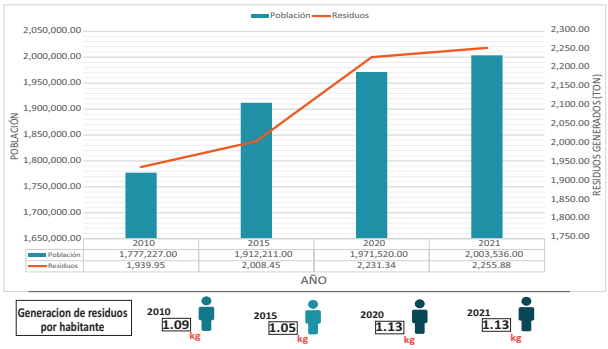


Figura 5. Población y generación de residuos.

A continuación se realizará una proyección de la población y la generación de residuos sólidos en el Estado de Morelos a 5, 10 y 20 años, primero se calcularán las tasas de crecimiento anual, promedio de población y generación de residuos durante los años 2010-2021. Luego se utilizarán dichas tasas de crecimiento para realizar las proyecciones. Además, se calculará la correlación positiva y negativa entre la población y la generación de residuos. Esto para comprender la severidad de la problemática en no tomar medidas a tiempo. Para calcular la tasa de crecimiento se utilizará la siguiente ecuación:

$$T_c(\%) = \frac{P_f - P_i}{P_i} \times \frac{1}{T_f - T_i} \quad (1)$$

donde T_c es la tasa de crecimiento, P_f es el valor final de población o generación de residuos y P_i es el valor inicial de la población o generación de residuos. Así también T_f es la fecha final y T_i la fecha inicial. Posteriormente, el resultado se expresa en porcentaje, lo que proporciona la tasa de crecimiento.

ISSN: 2992-8338

Utilizando los valores de la Figura 5 se obtienen las siguientes tasas de crecimiento promedio de población anual T_{pp} y de generación de residuos T_{pr}.

$$T_{pp} = (1{,}52\,\% + 0{,}62\,\% + 1{,}62\,\%)/3 = 1{,}253\,\% \quad (2)$$

$$T_{pr} = (0{,}71\,\% + 2{,}22\,\% + 1{,}1\,\%)/3 = 1{,}34\,\% \quad (3)$$

Para llevar a cabo la proyección poblacional, se empleará un modelo matemático geométrico. Esta elección se basa en la suposición de que el crecimiento de la población sigue un patrón geométrico, ya que un crecimiento aritmético o lineal resultaría poco realista. Esto se debe a que un crecimiento aritmético asume una tasa constante en cada intervalo de tiempo, y aunque el crecimiento exponencial podría ser una representación más realista que el primero, la constante disminución de la natalidad podría no proporcionar una proyección adecuada. Por lo tanto, hemos optado por utilizar un modelo geométrico cuya ecuación es la siguiente:

$$P_{x+t} = P_x(1+r)^k \quad (4)$$

donde P_{x+t} indica la proyección de población, P_x indica la población inicial o base, r es la tasa de crecimiento de población promedio de los datos anteriores y k es igual a la proyección en años a futuro.

Para llevar a cabo la proyección de la generación de residuos, no solo nos basaremos en un promedio de años anteriores, sino que también consideraremos un posible decrecimiento en la generación por persona. Esto se debe a que es deseable que las prácticas actuales de reducción en el uso de plásticos y envases tengan como objetivo disminuir la producción de residuos sólidos urbanos. Por lo tanto, la proyección de residuos está dado por la siguiente ecuación:

$$R_{p+t} = P_x(G_{ri}) \times (1+r_a) \times (1-r_r)^k \quad (5)$$

donde R_{p+t} es la proyección a futuro de residuos, P_x es el número de población, G_{ri} es el valor de residuos por habitante del año anterior, r_r es la tasa de reducción cada 5 años, r_a es la tasa constante de los datos anteriores y k es la proyección de años al futuro. Utilizando las Ecuaciones (4),(5) se obtienen los siguientes resultados.

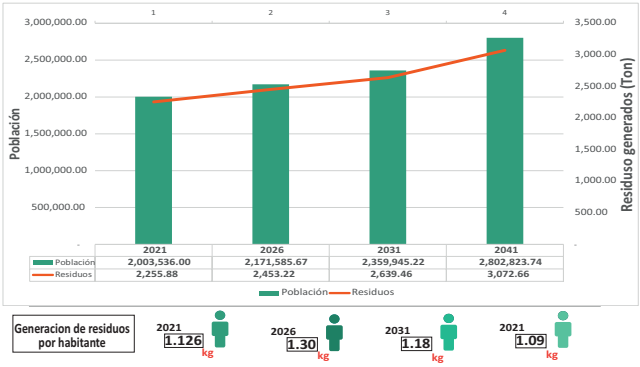


Figura 6. Proyección de población y generación de residuos.

Finalmente, para terminar con el análisis, es esencial evaluar la relación entre los datos proyectados para la generación de residuos y la población. Para lograrlo, se calculará el coeficiente de correlación, que proporcionará una medida cuantitativa de la fuerza y la dirección de esta relación. La correlación ayudará a determinar si el aumento proyectado en la población se traduce en un incremento proporcional en la generación de residuos, o si existen otros factores en juego.

La ecuación para calcular el coeficiente de correlación de Pearson (s) es la siguiente:

$$s = \frac{\sum[(P_p - M_p)(P_r - M_r)]}{\sqrt{\sum(P_p - M_p)^2 \sum(P_r - M_r)^2}} \quad (6)$$

donde s es el coeficiente de correlación, P_p es el valor actual de población, P_r es el valor actual de los residuos, M_p es la media de población y M_r es la media de generación de residuos.

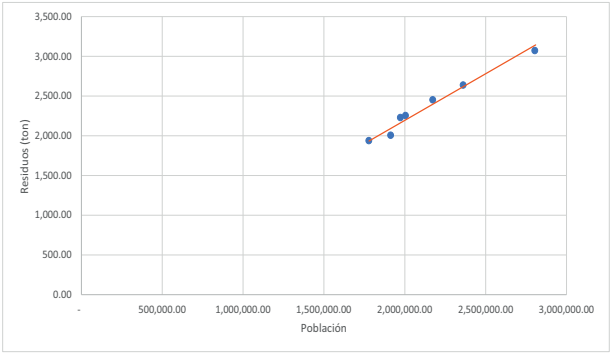


Figura 7. Correlación entre población y residuos.

6. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

En esta sección se presentará una propuesta de solución para la creciente problemática de la gestión de los residuos sólidos.

La metodología propuesta para la gestión de residuos sólidos implica diversas responsabilidades compartidas entre el municipio, el estado, organizaciones federales y la comunidad. Se divide en tres fases, pero es importante destacar que el objetivo principal de esta metodología es maximizar la valorización de los residuos sólidos. Esto se debe a que la mayoría de los elementos son aprovechables; del 38 % - 43 % corresponde a elementos valorizables (pet, cartón, vidrio y metales) que pueden ser vendidos, y del 40 % - 47 % restante son residuos orgánicos que pueden ser convertidos en abono económico para su uso en la agricultura o para ayudar a personas de escasos recursos. Dejando así solo de un 10 % al 25 % final de elementos que tendrán que ser llevados a un relleno sanitario que cumpla con las características para proteger el medio ambiente. Reduciendo así en gran medida los residuos finales que son desechados.

ISSN: 2992-8338

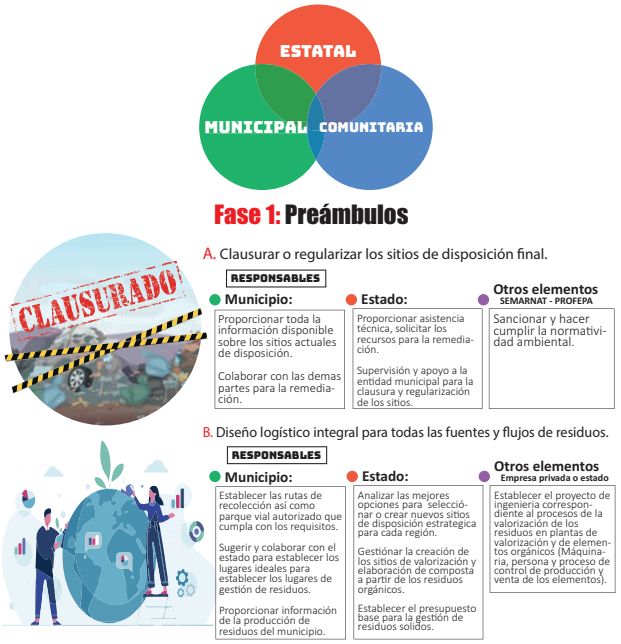


Figura 8. Preámbulos para la valorización.

La Figura 8 da inicio al proceso propuesto para la gestión de residuos, ilustrando el punto de partida de nuestro enfoque. Esta representación gráfica es fundamental para comprender cómo abordaremos eficazmente el manejo de los residuos en nuestro proyecto.

Clausura y Regularización de Sitios: Se busca la clausura definitiva de los lugares que no cumplen con los requisitos para una disposición adecuada de residuos o, en su lugar, se trabaja en su regularización para cumplir con las normativas. Esto asegura que los sitios de disposición cumplan con estándares ambientales y de seguridad.

Planificación Estratégica de Nuevos Sitios: Se planifica la habilitación de nuevos sitios de disposición, considerando regiones y garantizando que los municipios cercanos mantengan una distancia estratégica. Esto permite una disposición eficaz de elementos no valorizables. Se establecerá un diseño integral que incluirá la construcción de instalaciones para el tratamiento de materia orgánica con el fin de convertirla en composta. Además, se fomentará la separación de residuos sólidos y se asignarán días específicos para la recolección de elementos orgánicos y no orgánicos.

La Figura 9 representa la segunda parte nombrada como "Prácticas" esta esta formada por las acciones necesarias para designar responsables en la disposición y valorización de residuos, aspectos esenciales para lograr una gestión adecuada de los mismos. Esta figura continúa el proceso iniciado, detallando pasos cruciales en el camino hacia una gestión eficiente.

Valorización de residuos y la generación de material de composta: En esta sección, se establecen obligaciones y compromisos que deben ser asumidos por los diferentes actores, especialmente por la entidad encargada de operar los centros de valorización de residuos, ya sea una empresa privada seleccionada mediante licitación o una entidad gubernamental creada por el estado.

El objetivo principal de esta fase es maximizar la rentabilidad de los materiales a través de una adecuada clasificación, lavado, empaquetado, molienda o granulado, según las necesidades de los compradores, que deben contar con la aprobación de la entidad pertinente. Además, se enfoca en la producción de compost, que requiere un proceso previo de tamizado y esparcimiento en un área designada. Este proceso se somete a una supervisión constante para prevenir incendios y garantizar la calidad del compost. El propósito de esta parte es ofrecer materiales a precios accesibles o entregarlos a programas sociales destinados a apoyar a los agricultores.

Disposición final de los residuos restantes en un relleno sanitario: En esta sección se propone implementar un sistema de pesaje y control para vehículos autorizados previamente por el municipio, con el fin de generar informes de ingresos. Se busca mantener tasas de disposición muy bajas para recuperar costos y financiar la operación del relleno.

Figura 9. Prácticas para la valorización.

La última fase de esta propuesta Figura 10, denominada "Educación y Cultura", consta de dos secciones.

Campañas de concientización y educación de residuos: se implementan campañas de concienciación y educación sobre la gestión de residuos sólidos urbanos. Estas campañas abarcan todos los niveles educativos e involucran visitas guiadas para que los estudiantes conozcan el proceso. Además, se promueve la reducción del uso de materiales no ecológicos a través de anuncios en radio y televisión, se fomenta la separación de residuos y se brindan instrucciones para los días de recolección. Se difunden los resultados de las operaciones y se crean oportunidades para que estudiantes universitarios realicen prácticas en centros de investigación relacionados con

ISSN: 2992-8338

la gestión de residuos sólidos urbanos, con el objetivo de mejorar procesos y buscar soluciones que contribuyan a la protección del medio ambiente.

Sanciones y Cumplimiento de las Leyes Ambientales: Esta se enfoca en el papel del estado como entidad encargada de sancionar a los diversos actores involucrados en la generación y disposición de residuos. Se proponen leyes más rigurosas para promover el orden y una gestión adecuada de los residuos, garantizando el cumplimiento de las regulaciones ambientales.

Figura 10. Educación y cultura para la valorización.

7. CONCLUSIONES

Este artículo científico se enfoca en analizar la problemática de la gestión de residuos sólidos urbanos en Morelos. Tras analizar la composición de los residuos y la situación de los lugares de disposición, se realizó una proyección a las complicaciones futuras debido al crecimiento demográfico y la gestión inadecuada de estos residuos. Las propuestas se centran en soluciones, sobre todo en la colaboración de todas las partes involucradas. Desde el gobierno estatal y municipal hasta la población en general, ya que todos desempeñan un papel vital. La valorización de residuos, la promoción de prácticas sostenibles y la clasificación adecuada son parte de la solución. Este artículo busca crear conciencia y destacar la importancia de abordar esta problemática de manera conjunta. La colaboración entre todas las partes interesadas es esencial para lograr una gestión eficiente de los residuos y, como resultado, mejorar la calidad de vida de los habitantes de Morelos.

REFERENCIAS

Aguilar-Vera, R.A. (2019). La valorización de los residuos sólidos urbanos en el Estado de México, una visión geográfica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(3), 693–704. doi: https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.03.14.

Anne., S. and Michael., S. (2015). A tale of cities: Using recycling framework to analyse inclusive recycling performance. waste manage. *Sage Journals*, 33(11), 975–985. doi:10.1177/0734242X15600050.

Arce García, I.Y., Torres Salazar, M.d.C., Vera Dimas, J.G., Saldarriaga Noreña, H.A., León Hernández, V.A., and Peralta Abarca, J.d.C. (2022). Sistema integral de residuos sólidos urbanos para el centro histórico de Cuernavaca, Morelos, México. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. doi:10.26507/paper.2297. URL `https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2297`.

Bartra Gómez, J. and Delgado Bardales, J.M. (2020). Gestión de residuos sólidos urbanos y su impacto medioambiental. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 4(2), 993–1008. doi:10.37811/cl_rcm.v4i2.135. URL `https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/135`.

Gobierno de México (2019). Programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos para el estado de morelos. URL `https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187462/Morelos.pdf`. Descargado de la página de Gobierno de México.

INEGI (2022). Estadísticas de población 2022. URL `https://www.inegi.org.mx/estadisticas/estructura/poblacion/2022/`.

Nápoles, M.R. (2019-2024). Programa estatal de la gestión y manejo integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial en morelos. Technical report, Secretaria de desarrollo sustentable, Ubicación de la entidad gubernamental.

SDS (2017). Estrategia para la gestión integral de los residuos del estado de morelos. Technical report, Gobierno de Morelos, Subdirección de Jurismática.

ISSN: 2992-8338

Land Cover Image Classification

Antonio Rangel [*] **Juan Terven** [**] **Diana Cordova-Esparza** [***]
E.A. Chávez-Urbiola [**]

[*] *Instituto Tecnológico de Mazatlan. Anillo Periférico y Calle Huanacaxtle, Fracc. Pradera Dorada Mazatlán, Sin.*
[**] *Instituto Politécnico Nacional, CICATA-Querétaro. Cerro Blanco No. 141, Col. Colinas del Cimatario, 76090, Querétaro, Qro.*
[***] *Universidad Autónoma de Queretaro, Facultad de Informatica. Av. de las Ciencias S/N, 76230 Juriquilla, Querétaro, Qro.*

Abstract: Land Cover (LC) image classification has become increasingly significant in understanding environmental changes, urban planning, and disaster management. However, traditional LC methods are often labor-intensive and prone to human error. This paper explores state-of-the-art deep learning models for enhanced accuracy and efficiency in LC analysis. We compare convolutional neural networks (CNN) against transformer-based methods, showcasing their applications and advantages in LC studies. We used EuroSAT, a patch-based LC classification data set based on Sentinel-2 satellite images and achieved state-of-the-art results using current transformer models.

Keywords: remote sensing, deep learning, land cover, classification.

1. INTRODUCTION

Land Use Land Cover (LULC) is a multidisciplinary field that categorizes and characterizes the earth's terrestrial surface. It encompasses various types of ground, from natural landscapes such as forests, wetlands, and deserts to human-altered environments such as agricultural fields, urban areas, and industrial sites. LULC studies provide a snapshot of the earth's surface at a given time, offering valuable insights into the spatial distribution and interaction of various land use types and land cover classes. The dynamic nature of LULC, driven by both natural processes and human activities, necessitates continuous monitoring and analysis to capture temporal changes.

The importance of LULC studies extends to numerous fields. In environmental science, LULC data inform our understanding of biodiversity, ecosystem services, and the impacts of climate change. In urban planning and development, it helps to manage land resources, assess environmental impacts, and guide sustainable practices. LULC helps optimize land use for crop production in agriculture while minimizing environmental degradation. In addition, LULC data are integral to policy-making, supporting land conservation, urban growth, and climate change mitigation decisions.

Changes in Land Use Land Cover (LULC) offer insights into the dynamics of natural and human-altered landscapes, with applications spanning multiple disciplines. For example, LULC change data can elucidate the impacts of human activities on ecosystems, such as tracking deforestation rates to study biodiversity loss or carbon sequestration changes. LULC changes can also be used in climate change studies to influence local and global climates and inform climate modeling and future scenario prediction. LULC change data can inform the growth patterns of cities, aiding decisions about infrastructure development, zoning, and resource allocation. Monitoring LULC changes can optimize land use for crop production, identify shifts in agricultural practices, and assess environmental impacts. LULC change data also aids in disaster management, where changes in land cover, like deforestation, can increase vulnerability to natural disasters such as floods and landslides. Also, LULC changes inform policy decisions related to land conservation, urban growth, climate change mitigation, and sustainable development.

Traditionally, remote sensing for LULC mapping involved manual or semi-automated image classification processes. While efficient in their time, these techniques were often time-consuming and meticulous tasks that required human intervention and expert knowledge. The manual interpretation was potentially prone to errors and discrepancies and lacked the scalability to cover large geographical areas.

AI, specifically machine learning (ML) algorithms, has significantly improved the ability to detect remote sensing in LULC studies. These algorithms learn from vast amounts of data, building models that can forecast future scenarios or identify patterns with exceptional accuracy. Recent progress in computer vision, a subfield of AI, has encouraged the development of sophisticated algorithms to teach computers how to see and analyze large amounts of image data, including satellite or aerial imagery used in remote sensing.

Among the classic Machine Learning methods for modeling LULC is K-nearest neighbor from Thanh Noi and Kappas (2017) and Qian et al. (2014), Random Forests by Thanh Noi and Kappas (2017), Ma et al. (2017), Camargo et al. (2019), Ghimire et al. (2012), Adam et al. (2014),

* Project Funded by IPN SIP Project 20232290.

ISSN: 2992-8338

Fig. 1. Sample images from the EuroSAT dataset showing the ten categories.

Shiraishi et al. (2014), Raczko and Zagajewski (2017), and Lee et al. (2015), Support Vector Machines (SVM) have also been used in the works of Thanh Noi and Kappas (2017), Qian et al. (2014), Ma et al. (2017), Camargo et al. (2019), Shiraishi et al. (2014), Raczko and Zagajewski (2017), Srivastava et al. (2012), Pal and Ziaul (2017), and Otukei and Blaschke (2010). Other approaches such as Naive Bayes by Camargo et al. (2019), Decision trees by Thanh Noi and Kappas (2017), Qian et al. (2014), Camargo et al. (2019), and Otukei and Blaschke (2010), Classic Neural Networks in the works of Thanh Noi and Kappas (2017), Camargo et al. (2019), Shiraishi et al. (2014), Raczko and Zagajewski (2017), Srivastava et al. (2012), and Pal and Ziaul (2017), Maximum likelihood classifiers by Srivastava et al. (2012), Bagging in Ghimire et al. (2012), and Boosting in Ghimire et al. (2012).

More recently, Deep Learning-based models have taken the stage and dominated the remote sensing world with models based on Convolutional Neural Networks (CNNs) in the works of Marcos et al. (2018), Huang et al. (2018), Rezaee et al. (2018), and Shi et al. (2021). Autoencoders have also been used to learn a representation of the data in Zhou et al. (2015), Azarang et al. (2019), and Hu et al. (2021), Stacked Autoencoders by Zhao et al. (2017), and Sun et al. (2017), 3D Convolutional Autoencoders by Mei et al. (2019), multitask deep learning in Liu et al. (2020), Generative models by Hong et al. (2020), and Transformers by Hong et al. (2021), Xue et al. (2022), Qing et al. (2021), Jamali and Mahdianpari (2022), Dong et al. (2021), and Yao et al. (2023).

This paper compares classification methods for land cover. We compare standard Convolutional Neural Network methods as well as state-of-the-art Transformer-based methods. We share all the code this project uses at `github.com/jrterven/eurosat_classification`.

2. THE EUROSAT DATASET

Land Use Land Cover (LULC) categorizes and characterizes the earth's terrestrial surface. *Land use* describes the human activities directly related to the land, indicating how people utilize land resources, such as residential, agricultural, or commercial. *Land cover*, on the other hand, refers to the physical material at the surface of the earth, including grass, asphalt, trees, bare ground, water, etc.

The EuroSAT dataset Helber et al. (2019) contains ten classes with 27000 labeled and geo-referenced images taken from Sentinel-2 satellite images. The images are 64×64 and cover cities in the European Urban Atlas. The covered cities are distributed over the 34 European countries: Austria, Belarus, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic (Czechia), Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Macedonia, Malta, Republic of Moldova, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Ukraine and United Kingdom. Figure 1 shows one random sample image for each of the ten classes.

The dataset provides split for training, validation, and testing with 18900, 5400, and 2700 images per split, respectively. Figure 2 shows the distribution of images per class for the training set.

3. METHODS

3.1 Data Acquisition

We obtained the dataset from the original source (Phelber (2023)), ensuring authenticity and data integrity. This dataset provides a collection of ten categories, mostly balanced (see Figure 2), necessary for training and evaluating our classification models.

ISSN: 2992-8338

Fig. 2. Images distribution in the Training set.

3.2 Data Preprocessing and Training

We developed custom code for efficient data loading, preprocessing, and augmentation. The preprocessing steps included normalization and resizing of images. We trained ten models, seven convolutional architectures, and three transformer-based architectures. The convolutional models were AlexNet by Krizhevsky et al. (2012), ResNet50 by He et al. (2016), ResNeXt by Xie et al. (2017), DenseNet by Huang et al. (2017), MobileNetV3 from Howard et al. (2019), EfficientNetV2 by Tan and Le (2021), and ConvNeXt by Liu et al. (2022). The transformed models were ViT by Dosovitskiy et al. (2020), Swin Transformer by Liu et al. (2021), and MaxViT by Tu et al. (2022).

We trained all models using an early stop of ten epochs and kept the model with the best validation accuracy. We used the categorical cross-entropy loss and the Adam optimizer by Kingma and Ba (2014) with a learning rate of 1×10^{-4}.

Training from Scratch. Initially, we trained each of the ten models from scratch. This approach involved initializing the weights with the Kaiming Initialization proposed by He et al. (2015) and then retraining all layers using the RGB images of the EuroSAT dataset. The purpose of this step was to evaluate the learning capacity of each architecture without prior knowledge.

Training with Pre-trained Weights. Subsequently, we employed transfer learning by training the same models using pre-trained weights. These weights were obtained from models pre-trained on ImageNet.

3.3 Model Evaluation

We evaluated each model on the test set, which was not used during the training phase. As evaluation metrics, we compute the Top-1 accuracy and the precision/recall curves.

For our experiments, we used Pytorch and multiple computers: a Colab machine with NVIDIA V100 GPU, as well as two personal computers, one with TITAN X GPU and another equipped with RTX 4090 GPU.

4. RESULTS

In this section, we present the results of the classification task using ten influential deep learning architectures trained from scratch and retrained with pre-trained parameters. Table 1 shows the Top-1 accuracy on the test set.

Table 1. Classification accuracy comparison on ten deep learning models. The *Accuracy* column shows the results of the models trained from scratch, while the *Accuracy pre-trained* column shows the results of retraining with pre-trained weights. The first seven are convolutional-based models, while the last three are Transformer-based models.

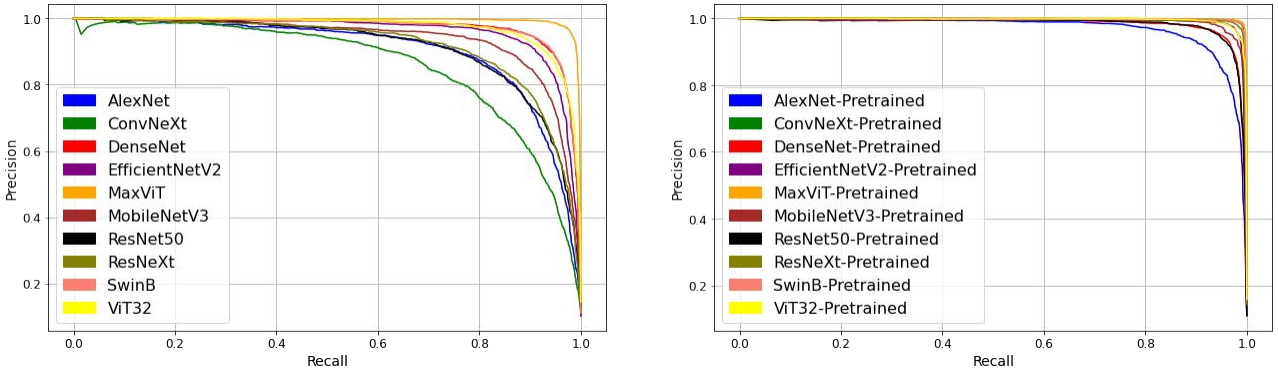
Model name	Accuracy	Accuracy pre-trained
AlexNet	0.837	0.916
ResNet	0.835	0.947
ResNeXt	0.843	0.981
DenseNet	0.925	0.949
MobileNetV3	0.877	0.958
EfficientNetV2	0.908	0.973
ConvNeXt	0.783	0.986
ViT32	0.917	0.972
SwinB	0.926	0.987
MaxViT	**0.973**	**0.990**

ISSN: 2992-8338

(a) Models trained from scratch

(b) Pretrained models

Fig. 3. Validation accuracy curves for the ten models. (a) Trained from scratch and (b) using pre-trained weights on ImageNet. Best viewed in color.



(a) Models trained from scratch

(b) Pretrained models

Fig. 4. Precision/Recall curves for the ten models. (a) Trained from scratch and (b) using pre-trained weights on ImageNet. Best viewed in color.

As shown in the table, the model with the highest scores is also the latest architecture that we tried, achieving a state-of-the-art 99% accuracy on this dataset.

Figures 3a and 3b show the validation accuracy curves obtained during training. It should be noted that the models trained with random weights (Figure 3a) took significantly longer to train and reached lower accuracy than the models trained with pre-trained weights (Figure 3b). We used the Weights and Biases (2023) platform to log the experiments and generate these graphs.

Figures 4a and 4b show the precision/recall curves for the ten models. The curves show that the models trained from scratch (Figure 4a) present more variability in their results, with ConvNeXt on the lower end and MaxViT on the higher end. For the pre-trained models, the curves are closer to each other, with AlexNet as the lowest-performance model and MaxViT on the higher end. Curiously, ConvNeXt was the lowest-performance model trained from scratch but was on par with the best models when trained with pre-trained weights. This may indicate that the transfer learning used with the pre-trained weights helps alleviate the relatively small size of this dataset for such a model.

5. CONCLUSION

Land cover image classification is a crucial task in understanding environmental changes, urban planning, and disaster management. In this paper, we explored using state-of-the-art deep learning models for enhanced accuracy and efficiency in LC analysis. We compared convolutional neural networks (CNN) against transformer-based methods, illuminating their applications and advantages in LC studies. Our results showed that both CNN and transformer-based methods achieved high accuracy in LC classification, with transformer-based models outperforming CNNs in some cases.

Using deep learning models in land cover classification offers a powerful avenue for research and applications. With the availability of large-scale remote sensing datasets and the rapid development of deep learning techniques, we can expect continued advancement in this field. As we move towards more automated and efficient methods for land cover classification, we can unlock the full potential of this data in addressing critical environmental and societal challenges.

ISSN: 2992-8338

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Instituto Politecnico Nacional through the Research and Postgraduate Secretary (SIP) project number 20232290 and the National Council of Humanities, Sciences, and Technologies (CONAHCYT) for its support through the National Research System (SNI).

REFERENCES

Adam, E., Mutanga, O., Odindi, J., and Abdel-Rahman, E.M. (2014). Land-use/cover classification in a heterogeneous coastal landscape using rapideye imagery: evaluating the performance of random forest and support vector machines classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 35(10), 3440–3458.

Azarang, A., Manoochehri, H.E., and Kehtarnavaz, N. (2019). Convolutional autoencoder-based multispectral image fusion. *IEEE access*, 7, 35673–35683.

Camargo, F.F., Sano, E.E., Almeida, C.M., Mura, J.C., and Almeida, T. (2019). A comparative assessment of machine-learning techniques for land use and land cover classification of the brazilian tropical savanna using alos-2/palsar-2 polarimetric images. *Remote Sensing*, 11(13), 1600.

Dong, H., Zhang, L., and Zou, B. (2021). Exploring vision transformers for polarimetric sar image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–15.

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., et al. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.

Ghimire, B., Rogan, J., Galiano, V.R., Panday, P., and Neeti, N. (2012). An evaluation of bagging, boosting, and random forests for land-cover classification in cape cod, massachusetts, usa. *GIScience & Remote Sensing*, 49(5), 623–643.

He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J. (2015). Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 1026–1034.

He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 770–778.

Helber, P., Bischke, B., Dengel, A., and Borth, D. (2019). Eurosat: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2217–2226. doi:10.1109/JSTARS.2019.2918242.

Hong, D., Han, Z., Yao, J., Gao, L., Zhang, B., Plaza, A., and Chanussot, J. (2021). Spectralformer: Rethinking hyperspectral image classification with transformers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–15.

Hong, D., Yao, J., Meng, D., Xu, Z., and Chanussot, J. (2020). Multimodal gans: Toward crossmodal hyperspectral–multispectral image segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(6), 5103–5113.

Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L.C., Chen, B., Tan, M., Wang, W., Zhu, Y., Pang, R., Vasudevan, V., et al. (2019). Searching for mobilenetv3. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 1314–1324.

Hu, M., Wu, C., Zhang, L., and Du, B. (2021). Hyperspectral anomaly change detection based on autoencoder. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 3750–3762.

Huang, B., Zhao, B., and Song, Y. (2018). Urban land-use mapping using a deep convolutional neural network with high spatial resolution multispectral remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, 214, 73–86.

Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., and Weinberger, K.Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 4700–4708.

Jamali, A. and Mahdianpari, M. (2022). Swin transformer and deep convolutional neural networks for coastal wetland classification using sentinel-1, sentinel-2, and lidar data. *Remote Sensing*, 14(2), 359.

Kingma, D.P. and Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G.E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 25.

Lee, R.Y., Ou, D.Y., Shiu, Y.S., and Lei, T.C. (2015). Comparisons of using random forest and maximum likelihood classifiers with worldview-2 imagery for classifying crop types. In *Proceedings of the 36th Asian Conference Remote Sensing Foster, ACRS*. Citeseer.

Liu, S., Shi, Q., and Zhang, L. (2020). Few-shot hyperspectral image classification with unknown classes using multitask deep learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(6), 5085–5102.

Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., and Guo, B. (2021). Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 10012–10022.

Liu, Z., Mao, H., Wu, C.Y., Feichtenhofer, C., Darrell, T., and Xie, S. (2022). A convnet for the 2020s. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 11976–11986.

Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P., and Liu, Y. (2017). A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 277–293.

Marcos, D., Volpi, M., Kellenberger, B., and Tuia, D. (2018). Land cover mapping at very high resolution with rotation equivariant cnns: Towards small yet accurate models. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 145, 96–107.

Mei, S., Ji, J., Geng, Y., Zhang, Z., Li, X., and Du, Q. (2019). Unsupervised spatial–spectral feature learning by 3d convolutional autoencoder for hyperspectral classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9), 6808–6820.

Otukei, J.R. and Blaschke, T. (2010). Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *In-*

ISSN: 2992-8338

ternational Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12, S27–S31.

Pal, S. and Ziaul, S. (2017). Detection of land use and land cover change and land surface temperature in english bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 125–145.

Phelber (2023). Eurosat: Land use and land cover classification with sentinel-2. URL `https://github.com/phelber/EuroSAT`.

Qian, Y., Zhou, W., Yan, J., Li, W., and Han, L. (2014). Comparing machine learning classifiers for object-based land cover classification using very high resolution imagery. *Remote Sensing*, 7(1), 153–168.

Qing, Y., Liu, W., Feng, L., and Gao, W. (2021). Improved transformer net for hyperspectral image classification. *Remote Sensing*, 13(11), 2216.

Raczko, E. and Zagajewski, B. (2017). Comparison of support vector machine, random forest and neural network classifiers for tree species classification on airborne hyperspectral apex images. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 144–154.

Rezaee, M., Mahdianpari, M., Zhang, Y., and Salehi, B. (2018). Deep convolutional neural network for complex wetland classification using optical remote sensing imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(9), 3030–3039.

Shi, Y., Ma, D., Lv, J., and Li, J. (2021). Actl: Asymmetric convolutional transfer learning for tree species identification based on deep neural network. *IEEE Access*, 9, 13643–13654.

Shiraishi, T., Motohka, T., Thapa, R.B., Watanabe, M., and Shimada, M. (2014). Comparative assessment of supervised classifiers for land use–land cover classification in a tropical region using time-series palsar mosaic data. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 7(4), 1186–1199.

Srivastava, P.K., Han, D., Rico-Ramirez, M.A., Bray, M., and Islam, T. (2012). Selection of classification techniques for land use/land cover change investigation. *Advances in Space Research*, 50(9), 1250–1265.

Sun, X., Zhou, F., Dong, J., Gao, F., Mu, Q., and Wang, X. (2017). Encoding spectral and spatial context information for hyperspectral image classification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(12), 2250–2254.

Tan, M. and Le, Q. (2021). Efficientnetv2: Smaller models and faster training. In *International conference on machine learning*, 10096–10106. PMLR.

Thanh Noi, P. and Kappas, M. (2017). Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using sentinel-2 imagery. *Sensors*, 18(1), 18.

Tu, Z., Talebi, H., Zhang, H., Yang, F., Milanfar, P., Bovik, A., and Li, Y. (2022). Maxvit: Multi-axis vision transformer. In *European conference on computer vision*, 459–479. Springer.

Weights and Biases (2023). The ai developer platform. URL `https://wandb.ai/site`. Accessed: 2023-12-01.

Xie, S., Girshick, R., Dollár, P., Tu, Z., and He, K. (2017). Aggregated residual transformations for deep neural networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 1492–1500.

Xue, Z., Tan, X., Yu, X., Liu, B., Yu, A., and Zhang, P. (2022). Deep hierarchical vision transformer for hyperspectral and lidar data classification. *IEEE Transactions on Image Processing*, 31, 3095–3110.

Yao, J., Zhang, B., Li, C., Hong, D., and Chanussot, J. (2023). Extended vision transformer (exvit) for land use and land cover classification: A multimodal deep learning framework. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

Zhao, C., Wan, X., Zhao, G., Cui, B., Liu, W., and Qi, B. (2017). Spectral-spatial classification of hyperspectral imagery based on stacked sparse autoencoder and random forest. *European journal of remote sensing*, 50(1), 47–63.

Zhou, W., Shao, Z., Diao, C., and Cheng, Q. (2015). High-resolution remote-sensing imagery retrieval using sparse features by auto-encoder. *Remote sensing letters*, 6(10), 775–783.

ISSN: 2992-8338

Proposal for an Infrastructure Inventory for the Estimation of Seismic Risk in an Urban Area

A. Cisneros-Mayoral*, M. Castro-Bello*, M. González-Durán, T.I. Hernández-Sánchez**, A. Jiménez-Alejo*, C.V. Marmolejo-Vega*, E.F. Valencia-Díaz***

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo*
Av. José Francisco Ruíz Massieu No. 5, Colonia Villa Moderna, C.P. 39090 Chilpancingo, Guerrero.
***Universidad Autónoma de Baja California/Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología*
Blvd. Universitario #1000. Unidad Valle de las Palmas Tijuana, B. C., C.P. 21500

Abstract: About 90% of the earthquakes in the world occur in the circumpacific region known as the Ring of Fire, exposing the countries of this region to a high risk of danger. This research proposes an infrastructure inventory to estimate and evaluate seismic risk in the urban area of Chilpancingo, Guerrero, Mexico, through the methodology FEMA-154, which consists of a form to describe the building: location, number of floors, year and building area, type of building, use, among others, to project their expected distribution and identify high-risk areas. This is intended to contribute to the development of a database of access for the different institutions to make decisions for disaster prevention.

Keywords: Inventory of buildings, Infrastructure, Seismic risk, Seismic hazard, Vulnerability.

1. INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de terremotos ha destacado el valor de la prevención, los efectos de los sismos han sido sustancialmente reducidos en países en donde se ha implementado una cultura sismo resistente. Además, la mayoría de las edificaciones fueron construidas con normas y criterios de diseño sísmico menos exigentes a los actuales, lo que ha demostrado que tienen un alto grado de vulnerabilidad (Andrés-López, 2014).

Alrededor del 90% de los terremotos en el mundo ocurren en la región circumpacífica conocida como el Anillo de Fuego del Pacífico, exponiendo a los países de esta región a un alto riesgo de peligro, Figura. 1, (Roque *et al.*, 2023).

Figura 1. Afectaciones del sismo, ciudad de México, 2017 (ABC Color).

Entre 2000 y 2019, estos fenómenos geofísicos representan el 9% de los desastres naturales (incluyendo tsunamis y actividad volcánica) en el mundo. A pesar de su frecuencia relativamente baja, los terremotos y tsunamis representan el 58% del total de las muertes por desastres naturales en las últimas dos décadas, (Freddi *et al.*, 2021). La aleatoriedad de la ocurrencia de terremotos ha dificultado, si no imposibilitado la elaboración de evaluaciones precisas de peligros sísmicos o pronósticos de terremotos (Geller, 1997).

La proximidad a regiones de alta actividad sísmica aumenta el grado de exposición de un sitio y da origen al peligro sísmico, que se combina con factores como el tipo de suelo, pobreza, el cambio climático, el crecimiento de la población y la urbanización incontrolada aumentan considerablemente la vulnerabilidad (Freddi *et al*., 2021). La vulnerabilidad es el grado de daño que sufre una estructura, ocasionado bajo cierto nivel de peligro sísmico, clasificando a los edificios en “más vulnerables” o “menos vulnerables” (Yépez *et al*., 1995).

La conjugación del peligro sísmico con la vulnerabilidad de una región o comunidad en particular da como resultado el Riesgo sísmico en un estrato urbano o una región, y se define como el producto de la probabilidad de alcanzar una aceleración del suelo multiplicado por la vulnerabilidad de una o varias estructuras durante un sismo (Sánchez-Tizapa *et al*., 2022; Yépez *et al*., 1995).

Para reducir el impacto físico de los terremotos, pérdidas humanas y económicas, se han implementado y desarrollado

ISSN: 2992-8338

estudios de evaluación del riesgo sísmico, propuesta de modelos de exposición que consideren la distribución geográfica y las principales características estructurales de edificaciones expuestas al peligro (Yepes-Estrada *et al*., 2017).

Por ejemplo, los inventarios de infraestructura son una recopilación detallada de información sobre todas las estructuras, instalaciones y componentes físicos existentes en una determinada área geográfica, con el propósito de evaluar su vulnerabilidad frente a eventos sísmicos (ChatGPT, 2022).

El escaso trabajo referente a la elaboración de inventarios de infraestructura para la estimación del riesgo sísmico en Guerrero tiene consecuencias graves en cultura de prevención, desarrollo de planes de seguimiento y toma de decisiones que disminuyan la vulnerabilidad. También impide la comprensión del estado actual del riesgo al que están expuestas las edificaciones y reduce la capacidad de planificación y respuesta en situaciones de desastres.

Dada la ubicación geográfica de Chilpancingo en una zona altamente sísmica, donde existe una convergencia de alto riesgo, vulnerabilidad y exposición, que puede ocasionar altos impactos catastróficos en víctimas, infraestructuras y generación de grandes cantidades de residuos que impactan al medio ambiente. Es importante generar bases de datos que determinen la vulnerabilidad de las edificaciones frente a eventos sísmicos, para reducir el efecto físico, ambiental, pérdidas humanas y económicas. Esta investigación propone un inventario de la infraestructura en la zona urbana de Chilpancingo, Guerrero, México para estimar y evaluar el riesgo sísmico, a través de una metodología FEMA-154 (Benjamín y Lockhart, 2011).

2. ESTADO DEL ARTE

Estudios realizados en Italia se basaron en una combinación de datos sociodemográficos y encuestas georreferenciadas, características de edificios como parámetros para proyectar la distribución esperada para cada parámetro individual y sus combinaciones, estimando la frecuencia de ocurrencia de clases de vulnerabilidad sísmica a nivel nacional y regional (Cacace *et al*., 2018). Otra iniciativa de evaluación del riesgo sísmico consistió en el desarrollo de un modelo para América del Sur que incluyó cuatro pasos principales: 1) Definición de clases de edificaciones, 2) Mapeo de datos del censo a clases de edificaciones, 3) Mapeo de viviendas a edificaciones, y 4) Estimación del costo de reposición (Yepes-Estrada *et al*., 2017). En Malasia evaluaron la vulnerabilidad sísmica a través de la metodología del Cribado Visual Rápido (CVR) de edificios, empleando el formulario de recopilación de datos de FEMA 154. Este enfoque identificó y clasificó edificios potencialmente peligrosos, especialmente aquellos construidos antes de la implementación de diseños sísmicos adecuados (Universiti Teknologi Malaysia, 2019).

Otro estudio comparativo sobre métodos de evaluación sísmica rápida de edificios de hormigón armado aplicó la metodología FEMA-154, las edificaciones se clasifican principalmente según sus sistemas estructurales. Cada sistema incluye una puntuación inicial que se evalúa en tres categorías diferentes: baja, media y alta, según la magnitud del terremoto que pueda ocurrir en la ubicación. En este método, la puntuación básica de la edificación evaluada se modifica mediante parámetros de vulnerabilidad donde mayor sea la puntuación final de la edificación, es más segura (Doğan *et al.,* 2021). En México se han desarrollado escasas investigaciones referentes a la evaluación de riesgo sísmico. Por ejemplo, evaluaron la vulnerabilidad sísmica mediante un análisis de las características de las edificaciones como: el año de construcción, tipo de suelo en el que se encuentra cimentada, espectacular en azotea y daños asociados a sismos antiguos y recientes (Barrios-Vázquez *et al*., 2021).

3. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación geográfica

El estado de Guerrero es uno de los más activos sísmicamente en el país, esto se debe a la entrada de la placa de Cocos (placa oceánica) por debajo de la placa de Norteamérica (placa continental) en un fenómeno que se conoce como subducción. La ciudad de Chilpancingo es la capital del estado, situada en la región centro (O 99°30'20.81", N 17°33'2.16").

3.2 Metodología

Con relación a la población, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el municipio de Chilpancingo cuenta con una población total de 283,354 habitantes, de los cuales 225,728 pertenecen a la zona urbana de Chilpancingo, la zona urbana está compuesta por una infraestructura de 72,343 viviendas con un promedio de 4 personas (INEGI, 2020).

La metodología utilizada en esta investigación será con el método cualitativo FEMA-154, que consiste en un formulario que considera una descripción de la edificación que incluye: localización, número de pisos, año de construcción, área deconstrucción, nombre del edificio, uso, foto, un espacio para esquematizar irregularidades tanto en planta como en elevación (Benjamín y Lockhart, 2011). La cual se desarrollará en:

a. Presentar a autoridades locales la investigación.

b. Capacitar y seleccionar al personal de apoyo (Tesistas de Ingeniería Civil) para la recolección de datos mediante formularios FEMA-154.

c. Elaborar el inventario de infraestructura sísmica de la zona urbana de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero.

d. Evaluar y analizar los datos del inventario para caracterizar las edificaciones del área de estudio.

e. Determinar el índice de vulnerabilidad.

ISSN: 2992-8338

e. Determinar el grado de riesgo sísmico.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La contribución de esta investigación consiste en proponer un inventario de infraestructura con el método FEMA-154 que permita la estimación del riesgo sísmico en la zona urbana de Chilpancingo, Guerrero, a través del análisis de las características de las edificaciones y su relación entre ellas Figura 2.

Identificador de edificio	Edificio comercial de estructura de mampostería confinada de igual o menor a 1000 metros cuadrados
Fotografía	
Puntuación básica de riesgo estructural	H = 2.8, M = 5.2, L = 7.4
Características	• Muros hechos de mampostería confinada y acabados en pasta. • Acabados exteriores en estuco. • Los edificios de este tipo se desempeñaron muy bien en terremotos pasados debido a las cualidades inherentes del sistema estructural. • Terremotos pasados causaron algunos daños en acabados, pero son considerados daños no estructurales • El tipo más común de daño estructural en edificios antiguos se debe a la falta de conexión entre la superestructura y la cimentación

Figura 2. Ejemplo de formulario con metodología FEMA-154.

5. RESULTADOS

La elaboración de un inventario de infraestructura para la estimación del riesgo sísmico en la zona urbana de Chilpancingo, Guerrero, y mapas de zonificación por el método FEMA-154 con base a las variantes de descripción de la edificación que incluye: localización, número de pisos, año de construcción, área deconstrucción, nombre del edificio, uso, foto, un espacio para esquematizar irregularidades, permitirán la estimación del riesgo sísmico y reducir el impacto de pérdidas humanas, económico y social de los terremotos.

Los resultados se compartirán mediante informes técnicos con los tomadores de decisiones como la Secretaría de Seguridad Pública y Protección Civil.

6. CONCLUSIONES

En conclusión, este trabajo se destaca por su contribución fundamental hacia una cultura de prevención y toma de decisiones basada en la gestión del riesgo sísmico. Por otra parte, la propuesta de solución, centrada en la creación de un inventario detallado, se presenta como una herramienta valiosa para planificar y desarrollar estrategias de mitigación del riesgo. Los resultados de este estudio no solo beneficiaran a Chilpancingo, sino que también establecerá un precedente para futuros estudios y contribuirá a la generación del conocimiento referente a la gestión del riesgo sísmico en zonas vulnerables.

BIBLIOGRAFÍA

Barrios-Vázquez O., Guinto-Herrera E.R., and Arroyo-Matus R. (2021) 'Vulnerabilidad sísmica de viviendas de mampostería confinada de baja altura ubicadas en el barrio de la Santa Cruz, de la ciudad de Chilpancingo de los Bravo, Guerrero.' Foro de Estudios sobre Guerrero, 8 (1).

Benjamín Hernández, J.D. & Lockhart Castro, S.A. (2011) 'Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de hormigón armado existente', Ciencia y Sociedad, 36(2), pp. 256–275. Disponible en: https://doi.org/10.22206/cys.2011.v36i2.pp256-275.

Cacace, F. et al. (2018) 'Building Inventory at National scale by evaluation of seismic vulnerability classes distribution based on Census data analysis: BINC procedure', International Journal of Disaster Risk Reduction, 28, pp. 384–393. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.016.

Doğan, T.P. et al. (2021) 'A comparative study on the rapid seismic evaluation methods of reinforced concrete buildings', International Journal of Disaster Risk Reduction, 56, p. 102143. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102143.

Geller, R.J. (1997) 'Earthquake prediction: a critical review', Geophysical Journal International, 131(3), pp. 425–450. Available at: https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x.

Freddi, F. et al. (2021) 'Innovations in earthquake risk reduction for resilience: Recent advances and challenges', International Journal of Disaster Risk Reduction, 60, p. 102267. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102267.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020) Censo de Población y Vivienda 2020 disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/cpv/2020/resultadosrapidos/default.html [Consulta: 09 noviembre 2023].

OpenAI. (2022). ChatGPT (Versión 3.5). OpenAI.

Potente terremoto en México deja muerte y destrucción - Internacionales - ABC Color disponible en: https://www.abc.com.py/edicion-impresa/internacionales/potente-terremoto-en-mexico-deja-muerte-y-destruccion-1630287.html (Consulta: 10 noviembre 2023).

Roque, P.J.C. et al. (2023) 'Earthquake Occurrences in the Pacific Ring of Fire Exhibit a Collective Stochastic

ISSN: 2992-8338

Memory for Magnitudes, Depths, and Relative Distances of Events'. arXiv. Disponible en: https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.00279.

Sánchez et al. (2022) Capitulo: Vulnerabilidad y riesgo sísmico en construcciones de Chilpancingo, Guerrero En: Estudios de riesgos y desastres Aspectos teóricos y prácticos. Ed. Por Navarro-García: Foro de estudios sobre Guerrero, 121-148.

School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, 81310, Johor, Malaysia et al. (2019) 'Vulnerability Assessment of Buildings in Ranau Township: Methodological Design', Jurnal Kejuruteraan, si2(1), pp. 1–7. Disponible en: https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-si2(1)-01.

Yepes-Estrada, C. et al. (2017) 'Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment', Earthquake Spectra, 33(1), pp. 299–322. Disponible en: https://doi.org/10.1193/101915eqs155dp.

Yepez, F., Barbat Barbat, H.A. and Canas Torres, J.A. (1995) Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE). Disponible en: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/27297 (Consulta: 1 Noviembre 2023).

ISSN: 2992-8338

Process Intensification in Advanced Distillation Technologies

José Iván Mejía-Juárez*. Brian Manuel González-Contreras*. Elsa Hynmar Fernández-Martínez*

**Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, C.P. 90300, México (Tel: 241-417-0529; e-mail:elsahynmar.fernandez@uatx.mx).*

Abstract: Distillation is a separation and purification operation commonly used in industrial chemical and petrochemical processes, but it requires high energy consumption and low thermodynamic efficiency; to solve these drawbacks, Process Intensification techniques and methodologies are applied to reduce equipment, achieve considerable energy savings, and increase the efficiency of the distillation process. In addition to the above, these improvements in intensified distillation technologies contribute directly to the objectives of sustainable development, reducing the carbon footprint and impacting on energy savings. In this research work, two case studies of interest in industrial chemical processes were addressed: Liquefied Natural Gas fractionation and ethanol dehydration. The comparison between conventional distillation systems and intensified distillation schemes was carried out. The findings of this research show that by applying Process Intensification, significant energy savings are generated, and the equipment involved is reduced.

Keywords: Process Intensification, Liquefied Natural Gas, Ethanol Dehydration, Dividing Wall Column, Enhanced Distillation.

1. INTRODUCCIÓN

La destilación es la operación unitaria de separación y purificación de mezclas más utilizada en el sector químico y petroquímico a nivel industrial y, al mismo tiempo, es un proceso intensivo, es decir, consume grandes cantidades de energía para llevar a cabo la separación. Otra desventaja que presenta tiene que ver con la baja eficiencia dentro de la columna. Derivado de ello, esta investigación presenta resultados preliminares centrados en analizar las simulaciones de esquemas de destilación intensificados de 2 estudios de caso en donde se disminuye la energía de separación, además de reducir el sistema de destilación.

1.1 Sistemas de destilación térmicamente acoplados

El modelo riguroso de una columna de destilación que se resuelve en cualquier simulador de procesos se denomina con el acrónimo MESH. Es representado por un conjunto de ecuaciones que resuelven los balances de materia y energía, las relaciones de equilibrio y las sumatorias. Haciendo un balance sobre la etapa de alimentación en estado estacionario, el modelo de la columna de destilación quedaría como:

$$F_j z_{i,j} + L_{j-1} x_{i,\,j-1} - V_{j+1} y_{i,j+1} - (L_j + U_j) x_{i,j} - (V_j + W_j) y_{i,j} = 0 \quad (1)$$

$$F_j h_{F,j} + L_{j-1} h_{L,\,j-1} - V_{j+1} h_{V,j+1} - (L_j + U_j) h_{L,j} - (V_j + W_j) h_{V,j} = 0 \quad (2)$$

$$K_{i,j} = \frac{y_{i,j}}{x_{i,j}} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{C} x_{i,j} = 1 \qquad \sum_{i=1}^{C} y_{i,j} = 1. \quad (4)$$

En (1)-(4) *F, L, V, U, W* representan los flujos de alimentación, líquido, vapor y extracciones laterales de las corrientes del líquido y vapor que entran y salen de la etapa de equilibrio. *x*, *y* y *z* son las composiciones de alimentación, líquida y vapor; *h* representa la entalpía, *i* el componente y *j* la etapa.

Una columna convencional es aquella que tiene una alimentación y dos productos; una columna compleja tiene dos o más corrientes de alimentación y una o más extracciones laterales. Por otro lado, en los sistemas térmicamente acoplados se aprovecha la energía dentro de una columna de destilación mediante la interconexión de corrientes entre columnas complejas, lo que reduce la energía de separación (disminución de las cargas térmicas en el condensador y rehervidor) y, por ende, los costos.

Los sistemas de destilación térmicamente acoplados se caracterizan por mostrar ahorros energéticos entre el 20% y 30% (Triantafyllow and Smith, 1993) y disminución en el costo total anual (TAC, por sus siglas en inglés) entre el 30% y 40% (Yuan, et al., 2020). El TAC es la suma de los costos de inversión o capital y los costos operativos (Biegler, et al., 1997), generados por las utilidades en el proceso de destilación.

Para separar convencionalmente una mezcla de 3 componentes existe tres configuraciones: directa, indirecta y preferida (Doherty and Malone, 2000). Dependiendo de la naturaleza de la mezcla, existen efectos de remezclado que disminuyen la

ISSN: 2992-8338

eficiencia de la columna e incrementa la energía de separación. Con la finalidad de resolver estos inconvenientes, una vez más, los sistemas de destilación térmicamente acoplados son considerados, los cuales disminuyen o eliminan dichos efectos de remezclado (Triantafyllow and Smith, 1993).

Debido a que los simuladores de procesos carecen de los modelos para diseñar un sistema de destilación térmicamente acoplado, se utilizan estrategias de simulación basadas en el esquema Petlyuk (Amminudin, et al., 2001), en donde se separa una mezcla ternaria (ver Fig. 1). Consiste en dos columnas interconectadas por cuatro corrientes (2 corrientes líquidas y 2 corrientes de vapor), las cuales suplen al condensador y rehervidor de la primera columna, denominada prefraccionador, la segunda es denominada como principal.

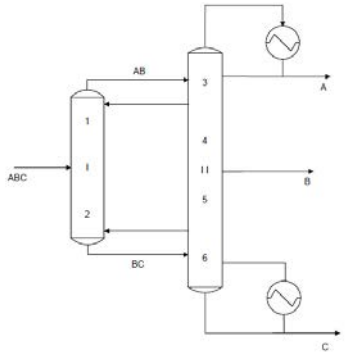


Figura 1. Configuración Petlyuk.

La Columna de Pared Dividida convencional (CDWC, por sus siglas en inglés) de la Fig. 2, es termodinámicamente equivalente a la columna Petlyuk y es la que se emplea operacionalmente a nivel industrial (Asprion y Kaibel, 2010). Las corrientes de interconexión líquidas y de vapor en la DWC fluyen de una sección a otra por efectos de presión.

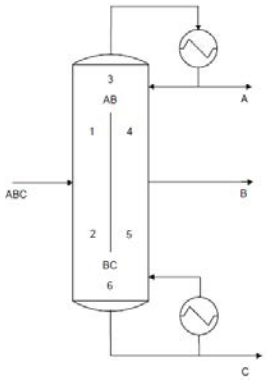
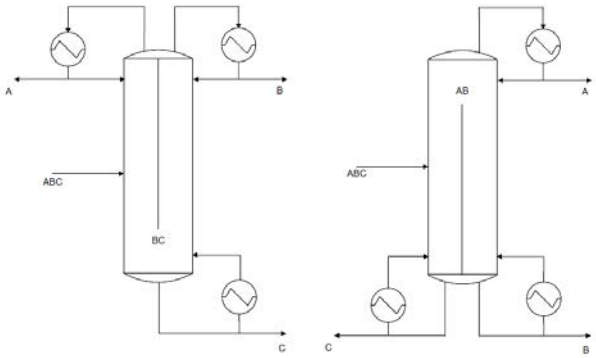


Figura 2. Representación esquemática de la Columna de Pared Dividida Convencional CDWC.

La CDWC tiene la pared a la mitad de la carcasa de la columna, esto quiere decir que en la configuración Petlyuk hay 4 corrientes de interconexión. Las DWC con pared en la parte superior (TDWC, por sus siglas en inglés) y con pared en la parte inferior (BDWC, por sus siglas en inglés) tienen 2 corrientes de interconexión (ver Fig. 3), reemplazando el rehervidor o el condensador, respectivamente.



(a) (b)

Figura 3. DWC con pared superior (a) y con pared inferior (b).

Otra de las configuraciones intensificadas es la columna Kaibel (Ghadrdan, Halvorsen y Skogestad, 2011; Kaibel, 1987), similar a la DWC, sólo que en esta hay 4 productos y, además, tiene más grados de libertad, lo que dificulta su diseño, optimización y control (Long and Lee, 2014).

Puesto que en este estudio se presenta la deshidratación del etanol mediante destilación extractiva intensificada (EDWC, por sus siglas en inglés), es necesario mencionar que la destilación extractiva convencional requiere de un tercer componente (acarreador) para desplazar o romper el azeótropo en un sistema. Tal es el caso de la mezcla Etanol/Agua que presenta un azeótropo de temperatura de ebullición mínima en 71.9ºC y en 89% molar. En la destilación extractiva intensificada también existen las configuraciones con pared superior (TEDWC) y con pared inferior (BEDWC): la aplicación de estas se debe a las condiciones de separación considerando siempre minimizar las cargas térmicas.

1.2 Intensificación de Procesos

La Intensificación de Procesos (IP) ha impactado en los sistemas de destilación (Kong, et al., 2022; Long y Lee, 2014) para generar nuevas tecnologías avanzadas que mejoran los procesos químicos industriales. De acuerdo con (Fernández et al., 2020), "el enfoque de la IP es lograr desarrollos en ingeniería química que generen tecnologías más compactas, más ecológicas y con un mayor rendimiento energético".

Desde el punto de vista cualitativo, los sistemas de destilación térmicamente acoplados cumplen con la definición de reducción de equipo, debido a que se emplea una sola columna para llevar a cabo el trabajo de separación comparados con los esquemas de destilación convencionales; además, se eliminan condensadores y rehervidores.

Otra de las ventajas de las tecnologías de destilación intensificadas es la disminución de la energía de separación, esto se logra al acoplar mediante las corrientes de interconexión dos columnas. Considerando la perspectiva de la IP, la aportación de este trabajo de investigación radica en la reducción de equipo y el ahorro energético.

ISSN: 2992-8338

2. METODOLOGÍA

Con la finalidad de cuantificar la IP mediante la energía de separación empleada en cada una de las tecnologías avanzadas de destilación, se llevaron a cabo simulaciones tanto en estado estable como en estado dinámico en UniSim Design R.460 de Honeywell. Los estudios de caso consideran el fraccionamiento de Gas Natural Licuado (GNL) para obtener hidrocarburos puros como el Etano, Propano, *n*-Butano e *i*-Butano, así como la recuperación de etanol deshidratado mediante EDWC, por la importancia que representa como carburante en mezclas con gasolina y su impacto en la huella de carbono. Asimismo, se llevó a cabo la comparación de la energía de separación de los sistemas convencionales contra diferentes configuraciones que incluyen sistemas de destilación térmicamente acoplados como la DWC convencional, la DWC con pared superior y la TEDWC.

2.1 Fraccionamiento de Gas Natural Licuado

La IP del fraccionamiento de GNL se llevó a cabo mediante dos estudios de caso. En el primero, se obtienen Etano y Propano puros mediante simulaciones del sistema de destilación convencional y el esquema intensificado (DWC) en estado estacionario; mientras que en el segundo se purifican Propano, *n*-Butano e *i*-Butano simulando el esquema de destilación convencional y el sistema intensificado mediante la columna Kaibel en estado estacionario, con la finalidad de cuantificar las cargas térmicas en el condensador y rehervidor.

El sistema convencional de destilación para separar y purificar Etano y Propano (ver Fig. 4) a partir del GNL, consiste en dos columnas. La primera se denomina desetanizadora con 18 platos (etapas), donde se alimenta una mezcla que contiene 9 hidrocarburos, desde C_1 hasta C_7 a 55.83 ºC, 31.37 bar y con una composición tomada de (Long and Lee, 2012a) para alcanzar una pureza del 95.13% en volumen de Etano.

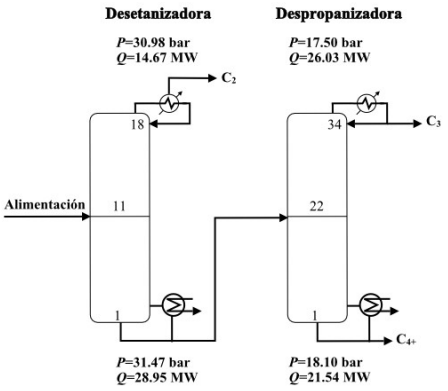


Figura 4. Sistema convencional para la desetanización y despropanización a partir de GNL.

El modelo termodinámico empleado para predecir el Equilibrio Líquido-Vapor (ELV) fue la ecuación cúbica de estado de Peng-Robinson, la cual estima adecuadamente las propiedades termodinámicas de los hidrocarburos. La segunda columna es la despropanizadora con 34 platos, en la cual se obtiene una pureza del Propano de 90.14% en volumen. El diseño de los sistemas tanto convencional como intensificado se tomaron de (Long and Lee, 2012a) y se reprodujeron en UniSimDesign con la finalidad de hacer una comparación entre simuladores, debido a que en la literatura se empleó Aspen Plus (simulador muy común en este tipo de esquemas).

El diseño de la CDWC se muestra en la Fig. 5, conservando el número de etapas de la desetanizadora y despropanizadora del sistema convencional para el prefraccionador (lado izquierdo de la pared) y también para la columna principal (lado derecho de la pared).

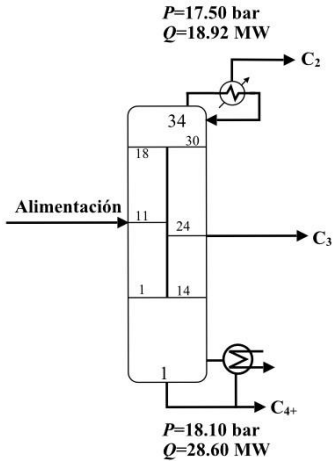


Figura 5. CDWC para la desetanización y despropanización a partir de GNL.

Se realizó una evaluación económica a través del tiempo (desde 1968 hasta marzo del 2022) con las simulaciones del esquema convencional y la CDWC para observar el comportamiento del TAC y de los ahorros energéticos dependientes de los costos de combustible.

El segundo estudio de caso consiste en purificar Propano, *n*-Butano e *i*-Butano para obtener purezas del 90.14, 97 y 95 % en volumen respectivamente; a partir de una corriente de alimentación de 8 hidrocarburos que van desde C_2 hasta C_7, considerando las especificaciones y el diseño de (Long and Lee, 2012b). La Fig. 6 representa la columna Kaibel conservando el número de etapas de la desbutanizadora del sistema convencional para el prefraccionador y las etapas de las desisobutanizadora para la columna principal. La columna se simuló a 17.5 bar para condensar el Propano, cuidando que las cargas térmicas de la separación no se incrementarán.

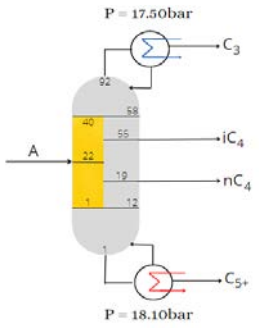


Figura 6. Columna Kaibel para el fraccionamiento de GNL.

ISSN: 2992-8338

2.2 Deshidratación de etanol

El modelo termodinámico para predecir el ELV del sistema no ideal Etanol/Agua fue UNIQUAC y se emplearon parámetros de la literatura (Kamihama, 2012) para así comparar los resultados. Las especificaciones y el diseño del sistema extractivo se tomaron de Tututi-Ávila, et al. (2014), cabe mencionar que en ese trabajo se empleó el simulador Aspen Plus. El número de etapas en las columnas de los sistemas convencional y TEDWC fueron diferentes porque se optimizó el diseño (Tututi-Ávila, et al., 2014).

Un etanol deshidratado tiene composiciones por arriba del 99.5% molar, esto se logra mediante destilación extractiva (Fig. 7), la cual consiste en dos columnas. En la primera columna (extractiva) se obtiene el etanol con alta pureza y la segunda columna es la recuperadora, donde se separa el agua y el solvente (etilenglicol, EG) y este se recircula. La selección del solvente se debe principalmente para modificar la curva de equilibrio (desplazar o romper el azeótropo de un sistema no ideal) y de otros factores ambientales, económicos y de operación (Tututi-Ávila, et al., 2014).

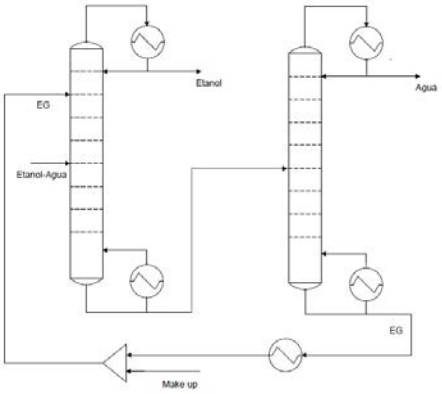


Figura 7. Destilación extractiva para deshidratar etanol.

El sistema de destilación extractivo convencional puede convertirse en un sistema intensificado como el que se muestra en la Fig. 8. Existe analogía entre la DWC y la EDWC, por lo que es relativamente sencilla su aplicación, ya que en ambas hay 2 columnas. La primera columna de la TEDWC es la columna extractiva y la segunda es la columna recuperadora. En esta configuración se ha eliminado el rehervidor de la columna recuperadora, este cambio en el esquema de destilación produce ahorros energéticos.

Previo al sistema de destilación extractiva se requiere una columna preconcentradora, en donde se alcanzan composiciones por debajo de la composición azeotrópica (84-85% molar). La columna preconcentradora y el sistema de destilación extractiva se intensifican en una CEDWC. Las especificaciones y el diseño del sistema convencional para simularse en UniSim Design se tomaron de (Kiss and Ignat, 2013a), mientras que el diseño de la CEDWC se obtuvo de (Kiss and Ignat, 2013b).

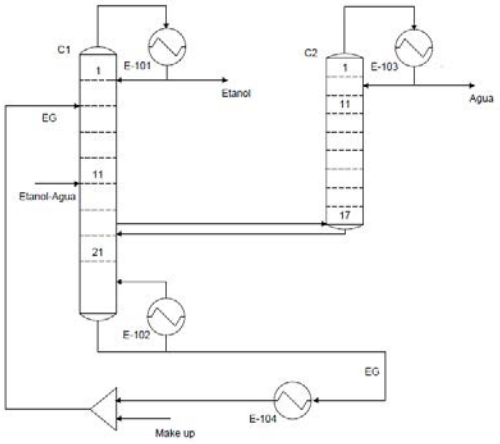


Figura 8. Esquema de Petlyuk extractiva para simular (TEDWC).

En esta configuración se tomaron las etapas de las columnas preconcentradora, extractiva y recuperadora del sistema convencional, más 8 etapas por debajo de las corrientes de interconexión inferiores a la pared.

Finalmente se muestra la simulación dinámica de la TEDWC para deshidratar etanol como último estudio de caso sobre las tecnologías de destilación intensificadas.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La importancia de aplicar la IP sobre los sistemas de destilación de los estudios de caso de este trabajo de investigación se centra en la reducción de equipos, ahorros energéticos y disminución de costos.

3.1 Fraccionamiento de Gas Natural Licuado

La Fig. 9 muestra la simulación de la CDWC en UniSim Design, recordar que la simulación se lleva a cabo con la configuración Petlyuk, la cual es termodinámicamente equivalente a la CDWC. Como resultado de la evaluación económica se obtuvo un ahorro energético del 43% y del 45% en el TAC con respecto al sistema convencional. También se observó que los costos de operación representan el 87% del TAC y que los tanques de las columnas representan más del 50% del costo capital; asimismo, el vapor consume más del 80% de los costos de operación tanto para el sistema convencional como para la CDWC.

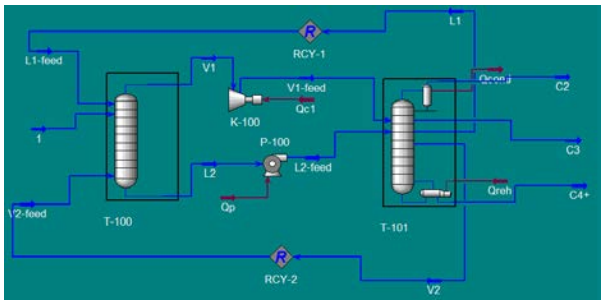


Figura 9. Simulación de la CDWC para desetanización y despropanización en UniSim Design.

ISSN: 2992-8338

En la Fig. 10 se muestra la simulación del sistema convencional para la obtención del Propano, *n*-Butano e *i*-Butano puros. La IP aplicada a esta configuración consiste en llevar a cabo la misma tarea de separación, pero con la columna Kaibel mostrada en la Fig. 6. Los ahorros energéticos obtenidos al hacer la comparación con el esquema de destilación convencional fueron del 25.8%; independientemente de la evidente reducción de equipos (2 columnas, 2 condensadores y 2 rehervidores).

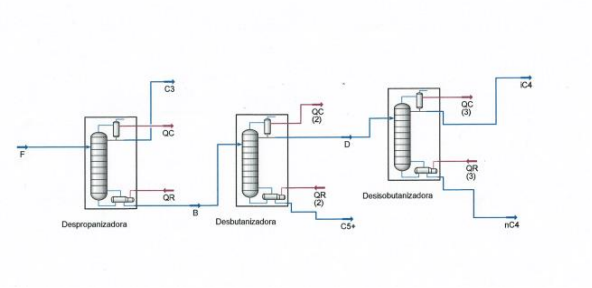


Figura 10. Simulación del sistema convencional para el fraccionamiento de GNL en Unisim Design.

3.2 Deshidratación de etanol

La deshidratación de etanol en estado estacionario de la TEDWC se presenta en la Fig. 11. La comparación del sistema convencional con la TEDWC fue de un ahorro energético del 13.5%. En cuanto a la reducción de equipo, se omitió el rehervidor en la columna recuperadora.

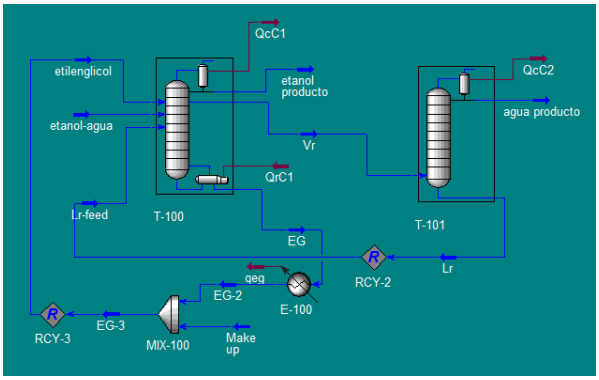


Figura 11. Simulación en estado estacionario de la TEDWC para deshidratar etanol.

En la Fig. 12 se muestra la deshidratación de etanol mediante el esquema convencional incluyendo la columna preconcentradora. Como puede observarse se requieren 3 columnas convencionales para llevar a cabo la separación y así obtener el etanol deshidratado; cada columna tiene su condensador y su rehervidor.

La energía de separación se debe principalmente al uso de utilidades (agua de enfriamiento y vapor) en el condensador y en el rehervidor; aunque pueden presentarse otras situaciones propias de la destilación como el remezclado dentro de la columna, lo que provoca un aumento de energía.

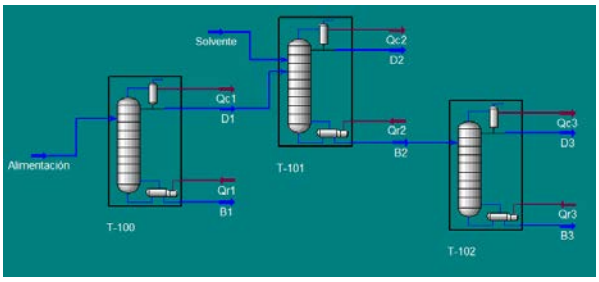


Figura 12. Simulación convencional de la deshidratación de etanol incluyendo la columna preconcentradora.

Cuando se aplica la IP mediante el uso de sistemas de destilación térmicamente acoplados es evidente la reducción de equipos. La tarea de separación se hace operativamente con una columna dividida por una pared, internamente esta columna tiene las 3 columnas del sistema convencional.

La Fig. 13 muestra la simulación de la columna intensificada de la deshidratación de etanol mediante una CEDWC, simulando la configuración Petlyuk, por la falta de modelo en el simulador de la configuración intensificada, pero termodinámicamente equivalentes.

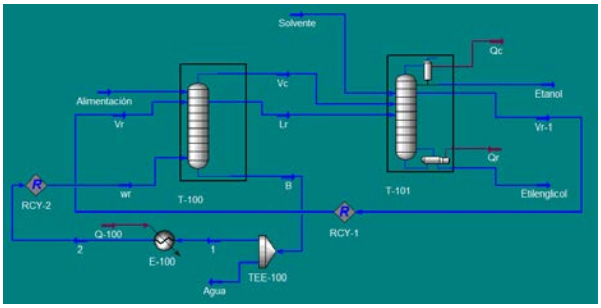


Figura 13. CEDWC incluyendo la preconcentradora.

En el sistema convencional, la columna preconcentradora representa alrededor del 55% de la energía total de separación, por lo que esta columna es un área de oportunidad de estudio. El ahorro energético de la CEDWC con respecto al sistema convencional para deshidratar el etanol fue de 36.71%.

Finalmente, en la Fig. 14 se muestra la simulación dinámica de la deshidratación de etanol mediante destilación extractiva intensificada (TEDWC). La simulación dinámica de este sistema es más compleja que el estado estacionario, ya que aquí se incluye el control de diferentes variables como la temperatura, la presión en el domo de la columna, los niveles del tanque de condensados y del sumidero de la columna, flujo de alimentación y relación de reflujo.

Asimismo, se especificaron las alturas de los equipos con la finalidad de llevar a cabo la tarea de separación en estado dinámico, el tipo de platos, espaciamiento entre ellos y otras variables relevantes en el diseño. El ahorro energético de la simulación dinámica con respecto al sistema convencional en estado estacionario fue del 12.5%. Relativamente inferior al 13.5% reportado en estado estacionario, esto se puede atribuir a una diferencia de presión entre las simulaciones.

ISSN: 2992-8338

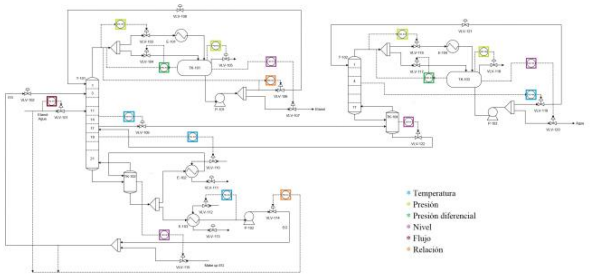


Figura 14. Simulación dinámica mediante TEDWC para deshidratar etanol.

4. CONCLUSIONES

Se presentó la IP en columnas de destilación térmicamente acopladas, las cuales representan el futuro sostenible orientado a impactar el ahorro energético en los procesos químicos y la huella de carbono. Se realizó la comparación de resultados entre Aspen Plus reportados en la literatura contra UniSim Design utilizado en esta investigación, lo que mostró que las bases de datos termodinámicas son diferentes y, por ende, los parámetros de los modelos termodinámicos. Esto podría representar una limitante que se estudiará en trabajos posteriores. Se comprobó a través de las simulaciones de los diferentes esquemas de destilación intensificados que la IP representa una ventaja desde el punto de vista sostenible, dada la factibilidad para lograr reducción de equipos, ahorros energéticos y disminución de costos.

REFERENCIAS

Amminudin, K. A., Smith, R., Thong, D. Y.-C., and Towler, G. P. (2001). Design and optimization of fully thermally coupled distillation columns. *Chemical Engineering Research and Design*, 79(7), 701-715. https://doi.org/10.1205/026387601753192028

Asprion, N., and Kaibel, G. (2010). Dividing wall columns: Fundamentals and recent advances. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(2), 139-146. https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.01.013

Biegler, L.T., Grossmann, I. E. and Westerberg, A.W. (1997). *Systematic Methods of Chemical Process Design*. Prentice Hall. EUA.

Doherty, M. F. and Malone, M. F. (2001). *Conceptual Design of Distillation Systems.* Mc Graw-Hill, USA, .

Fernandez Rivas, D., Boffito, D. C., Faria-Albanese, J., Glassey, J., Afraz, N., Akse, H., Boodhoo, Kamelia. V. K., Bos, R., Cantin, J., (Emily) Chiang, Y. W., Commenge, J.-M., Dubois, J.-L., Galli, F., De Mussy, J. P. G., Harmsen, J., Kalra, S., Keil, F. J., Morales-Menendez, R., Navarro-Brull, F. J., … Weber, R. S. (2020). Process intensification education contributes to sustainable development goals. Part 1. *Education for Chemical Engineers*, 32, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.04.003

Ghadrdan, M., Halvorsen, I. J., and Skogestad, S. (2011). Optimal operation of Kaibel distillation columns. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(8), 1382-1391. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.02.007

Kaibel, G. (1987). Distillation columns with vertical partitions. *Chemical Engineering & Technology*, 10(1), 92-98. https://doi.org/10.1002/ceat.270100112

Kiss, A. A., and Ignat, R. M. (2013a). Optimal economic design of an extractive distillation process for bioethanol dehydration. *Energy Technology*, 1(2-3), 166-170. https://doi.org/10.1002/ente.201200053

Kiss, A. A., and Ignat, R. M. (2012b). Innovative single step bioethanol dehydration in an extractive dividing-wall column. *Separation and Purification Technology*, 98, 290-297. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.06.029

Kong, Z. Y., Sánchez-Ramírez, E., Yang, A., Shen, W., Segovia-Hernández, J. G., and Sunarso, J. (2022). Process intensification from conventional to advanced distillations: Past, present, and future. *Chemical Engineering Research and Design*, 188, 378-392. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.09.056

Long, N.V.D., and Lee, M. (2012a). Improvement of the deethanizing and depropanizing fractionation steps in ngl recovery process using dividing wall column. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 45(4), 285-294. https://doi.org/10.1252/jcej.11we187

Long, N.V.D., and Lee, M. (2012b). Improvement of natural gas liquid recovery energy efficiency through thermally coupled distillation arrangements. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7(S1). https://doi.org/10.1002/apj.643

Long, N. V. D., and Lee, M. (2014). Review of retrofitting distillation columns using thermally coupled distillation sequences and dividing wall columns to improve energy efficiency. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 47(2), 87-108. https://doi.org/10.1252/jcej.13we067

Triantafyllou, C., and Smith, R. (1993). The design and optimization of dividing wall distillation columns. En P. A. Pilavachi (Ed.), *Energy Efficiency in Process Technology* (pp. 351-360). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1454-7_32

Tututi-Avila, S., Jiménez-Gutiérrez, A., and Hahn, J. (2014). Control analysis of an extractive dividing-wall column used for ethanol dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 82, 88-100. https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.05.005

Yuan, Y., Huang, K., Chen, H., Qian, X., Zang, L., Zhang, L., and Wang, S. (2020). Comparing composition control structures for kaibel distillation columns. *Processes*, 8(2), 218. https://doi.org/10.3390/pr8020218

ISSN: 2992-8338

Design and development of a semi-automatic spot welder prototype

E. A. de la Cruz Hernández*. J. M. Bautista Hernández, A. Y. Cuevas González, M. L. Mendoza Chávez, R. A: Torres Mondragón, J. S. Valdez Martínez, J. Villanueva Tavira

** División Académica de Mecánica Industrial, Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Av. Universidad Tecnológica No. 1, Col, Palo Escrito, Emiliano Zapata, Morelos, México;*

e-mail: 20213mc074@utez.edu.mx, 20213mc065@utez.edu.mx, 20213mc073@utez.edu.mx, 20213mc092@utez.edu.mx, 20213mc054@utez.edu.mx, jorgevaldez@utez.edu.mx, jonathan.vt@cenidet.tecnm.mx

Abtract: This manuscript illustrates the development of a semi-automatic welder prototype designed to prevent accidents and minimize exposure to toxic substances for welding operators. Emphasis is placed on the importance of raising awareness among users about the risks associated with conventional welders and promoting interest in safer and more efficient technologies. The project involved reviewing technological advancements, creating sketches, obtaining material quotations, developing control programs in Arduino IDE, 3D simulation using SolidWorks, and implementing a mobile application to control the welder. Following testing, the project was deemed successful, meeting the established objectives and showcasing the potential of emerging technologies to enhance efficiency and safety in both industrial and domestic settings.

Keywords: Prototype, Spot welder, Industry 4.0, Arduino.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura, una técnica ampliamente utilizada en diversas industrias, conlleva varios riesgos significativos para los operadores. Una de las amenazas más inmediatas y graves que enfrentan los soldadores es la descarga eléctrica. Estas descargas pueden provocar lesiones graves o incluso la muerte, ya sea directamente por la electricidad o por las caídas que pueden resultar de una reacción ante una descarga. La descarga eléctrica ocurre cuando los soldadores entran en contacto con dos objetos metálicos que tienen un voltaje entre ellos, convirtiéndose inadvertidamente en parte del circuito eléctrico (TDI, 2022).

También la exposición a humos y gases de soldadura también es un riesgo significativo para la salud. El humo de soldadura contiene compuestos potencialmente dañinos, lo que hace crucial mantener una distancia segura y usar sistemas de ventilación adecuados para reducir la exposición a estas sustancias tóxicas (Hopkins, 2023).

El objetivo de este trabajo es mostrar el desarrollo de un prototipo de soldador semiautomático práctico, sencillo y seguro para el usuario, que ayudará a evitar los accidentes al minimizar la exposición a sustancias tóxicas y facilitar el trabajo mediante el uso de interfaces de usuario máquina realizadas con aplicaciones para teléfonos inteligentes. Para ello, se realizará la investigación de funcionamiento básico del producto que se pretende obtener, y mediante la aplicación de conocimientos en electrónica, control, mecánica y programación, se podrá llegar a un resultado final aceptable. Esto se hará mediante la identificación los componentes en el mercado para la construcción del prototipo, el desarrollo de un sistema de control para la automatización de la soldadora y así crear un sistema eficiente y seguro para su uso.

La justificación de este proyecto radica en la búsqueda de una solución viable para los usuarios, mejorando la eficacia y seguridad en los trabajos relacionados con este proceso artesanal. Este prototipo no solo es económicamente rentable, sino que también se presenta como una alternativa esencial en actividades y trabajos de este tipo.

En resumen, el alcance del desarrollo tecnológico hecho consiste en persuadir a las personas sobre la peligrosidad de las soldadoras convencionales, especialmente para aquellos sin experiencia en este tipo de actividades, y promover la adopción de este prototipo como una solución efectiva para prevenir accidentes

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En torno al 80 % de los trabajos de soldadura de acero se llevan a cabo mediante el sistema de soldadura por puntos, una técnica ampliamente empleada en diversos sectores industriales, especialmente en grandes industrias como la automotriz y la aviación, donde se fabrican y reparan piezas con la ayuda de robots y máquinas portátiles que no requieren una mecanización posterior .

Para orientar el desarrollo de este trabajo, se revisaron algunos artefactos semejantes a lo que se pretende desarrollar. Uno de los trabajos consultados fue el de (Aguirre & Baigorri, 2013), reportado en la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual titulado “Electromandrino con control de fuerza axial para soldadura

ISSN: 2992-8338

por fricción y otras aplicaciones". Este dispositivo integró un sensor de fuerza en el cuerpo del electromandrino y utiliza un actuador electromecánico para regular en tiempo real y localmente la altura de la herramienta sobre el material a soldar, manteniendo una fuerza constante y controlada durante el proceso.

En la patente reportada en la OMPI de (Chica et al, 2013), se desarrolló un dispositivo para la formación en soldadura basado en simulación con realidad aumentada y actualizable en remoto. Esta herramienta permite la simulación de diversos tipos de soldadura industrial (electrodo revestido, MIG/MAG y TIG) en diferentes materiales y posiciones de soldeo. Utiliza tecnología de Realidad Aumentada para simular con precisión el comportamiento de una máquina de soldar real. Además, integra un sistema de control, seguimiento y evaluación de los alumnos, lo que permite al profesor verificar el aprendizaje en tiempo real, incluso de forma remota.

Ambos proyectos destacan por su enfoque innovador y por la aplicación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficacia y la precisión en el proceso de soldadura. Y sirvieron de base para el desarrollo del trabajo reportado en este manuscrito, que también se apoya en diversas herramientas y conceptos específicos para alcanzar sus objetivos. Estos recursos y temas se detallarán en la siguiente sección para proporcionar una comprensión completa del enfoque adoptado en este trabajo.

3. DESARROLLO

En el proceso de desarrollo de este proyecto, se llevaron a cabo varias etapas fundamentales que permitieron alcanzar los resultados deseados. En primer lugar, se realizaron bosquejos detallados de los integrantes del equipo, de los cuales destacan los que se muestran en la figura 1 y 2. El primer bosquejo presenta una concepción inicial que muestra el perfil del prototipo que se pretende desarrollar como soldadora de punto.

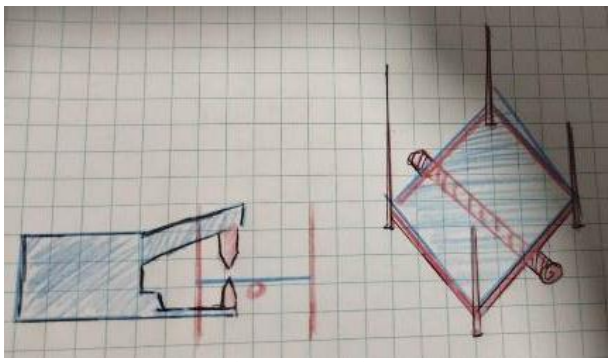


Figura 1. Bosquejo 1

En el siguiente bosquejo se muestra una representación de diseño con movimientos en los ejes X y Y:

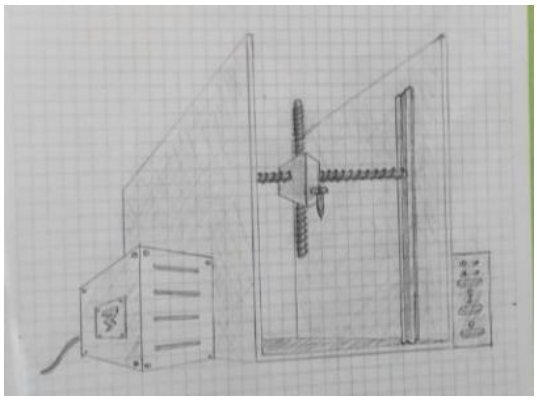


Figura 2. Bosquejo 2

Posteriormente, se llevó a cabo una cuidadosa cotización de los materiales necesarios para el proyecto, con un costo total de $3080. Esto se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de materiales

Material	Precio unitario	Cantidad	Total
Transformador	600	1	600
Varilla roscada	100	2 m	200
Puente H	80	4	320
Arduino Uno	500	1	500
Motor Pololu 12 V	200	4	800
Cable cobre 12mm	150	2 m	300
Varilla lisa	80	2 m	160
Cople de acero	50	4	200
		Total	$3080

Para controlar la soldadora en su modo semiautomático, se desarrollaron programas específicos en el entorno de Arduino IDE. Estos programas permitieron la creación y control del sistema semiautomático de la soldadora de punto. En la Figura 3 se muestra un diagrama general para la programación.

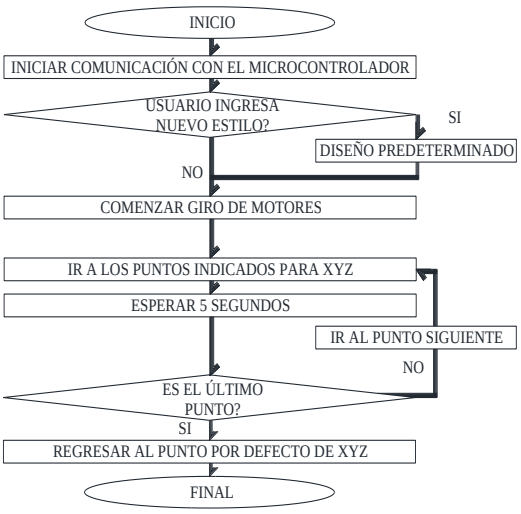


Figura 3. Diagrama general de la programación

ISSN: 2992-8338

En el diagrama se observa que se tendrá un sistema de control proporcionado por un microcontrolador que se comunicará con la aplicación desarrollada para teléfono inteligente. Esto con el fin de poder manipular el movimiento para soldar del prototipo desarrollado.

En la Figura 4 se presenta el diagrama de bloques de la programación del microcontrolador para la operación de motores, detallando las funciones a realizar. En este caso, de los datos enviados por la aplicación, se interpretan los valores que tendrán como fin colocar la ubicación correcta para realizar el proceso de soldadura.

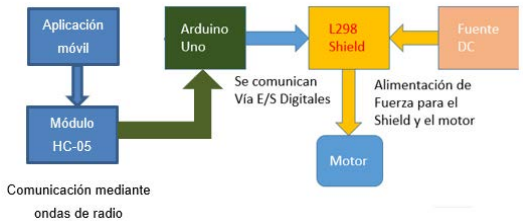


Figura 4. Diagrama del funcionamiento del control de los motores

El programa desarrollado en C se diseñó para facilitar la creación y control del sistema semiautomático de la soldadora de punto, mientras que las simulaciones en 3D se llevaron a cabo utilizando SolidWorks® (Dassault Systèmes, 2023) para evaluar el ensamblaje de las piezas y sus movimientos en los ejes XYZ, como se muestra en la Figura 5.

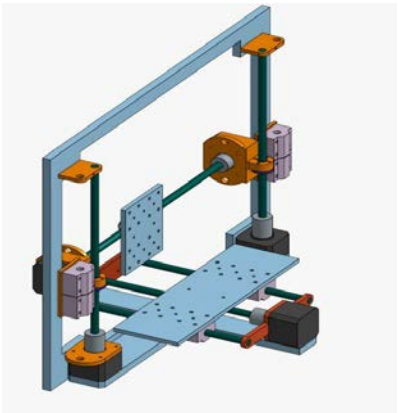


Figura 5. Diseño del mecanismo de movimiento de los ejes XYZ

En esta figura, se aprecia la estructura mecánica que tendrá el prototipo. Contará con tres ejes de movimiento. Se tendrá un desplazamiento longitudinal (eje X), transversal (eje Y) y desplazamiento perpendicular (eje Z) que serán generados por los motores pololu. Estos motores tendrán acoplado en el eje una varilla roscada con el cual se podrá realizar el desplazamiento en los ejes correspondientes al transformar el movimiento de rotación en movimiento lineal.

En cuanto al armado de la carcasa del prototipo, se construyeron las estructuras para los ejes X, Y y Z. La Figura 6 muestra la base para el artefacto que fue desarrollado, el cual servirá para el soporte de movimiento en los ejes X, Y y Z. Cabe mencionar que la estructura fue realizada de madera, debido a que se consideró que era material fácil para poder ser manejado (y fue el que se tenía a la mano). Además, fue por razones de seguridad, debido a que se manejan altas corrientes para el proceso de soldadura, En versiones futuras de este prototipo, se considerará realizarla de otro material más resistente.

Figura 6. Mecanismos de movimiento terminados

Se diseñaron puertas y muros para acceder al circuito interno y protegerlo, como se muestra en la Figura 7. En este caso la protección fue más para el usuario que para el artefacto desarrollado, debido al manejo de alta corriente.

Figura 7. Puerta para acceder al circuito de control y de potencia

Se implementaron bases y soportes para los ejes Y y Z, como se muestra en la Figura 8. En este caso las bases van sujetas a los soportes y al sistema de desplazamiento tipo husillo impulsado por los motores pololu.

Figura 8. Base y soportes del eje “y” que fueron armados

Se diseñaron piezas adicionales para el soporte de rodamientos y el movimiento del eje X, como se muestra en las Figura 9. En los soportes, es en donde descansa la varilla acoplada a los motores de DC, que permiten el desplazamiento longitudinal y transversal del prototipo.

ISSN: 2992-8338

Figura 9. Base para el rodamiento y Eje x con oruga

En cuanto a los circuitos electrónicos, se utilizó una tarjeta Arduino Uno para enviar señales a los puentes H, los cuales controlaron los movimientos en los ejes X, Y y Z. El diagrama de bloques del circuito de control se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Diagrama de bloques del circuito de control

Para el diseño eléctrico específico para el control de dos de los cuatro motores se presenta en la Figura 11. La tarjeta Arduino, enviara la interpretación de los datos adquiridos por la interfaz de la aplicación desarrollada, hacia los motores para poder generar el desplazamiento requerido y hacer el punto de soldadura.

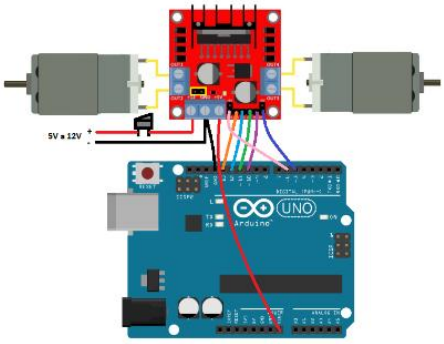


Figura 11. Diagrama eléctrico del sistema de control

Para poder verificar el funcionamiento del programa, se realizaron simulaciones detalladas del circuito de control en el software ISIS de Proteus® (Labcenter Electronics, 2023), como se muestra en la Figura 12. Con esto se pudo constatar que la programación cumplía con lo requerido para el prototipo.

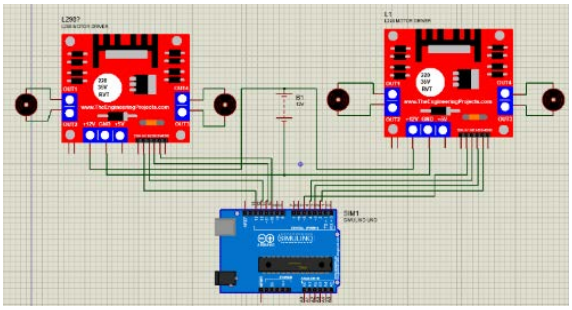


Figura 12. Simulación del circuito de control

La implementación del circuito de potencia se llevó a cabo conectando el transformador al relé que habilita la corriente hacia los electrodos que realizan la función de unir piezas metálicas mediante el proceso de soldadura. En la programación se asigna un tiempo de operación, esto con el fin de que no se sobrecargue el circuito y se queme. En la Figura 13 se observa el transformador empleado, el cual es de alta tensión primaria, maneja 230-240V a 50Hz y es ampliamente usado para hornos de microondas.

Figura 13. Conexión del transformador al Relé y circuito de potencia

En la figura 14 se puede observar el espacio asignado de la carcasa que aloja al circuito de control generado por la tarjeta de desarrollo Arduino, así como la sección de potencia que maneja el paso de la corriente que fluye hacia los electrodos.

Figura 14. Conexión con Arduino que controla todas las funciones

Para la integración con la industria 4.0, se utilizó una aplicación móvil llamada Arduino Bluetooth Controller (Giumig Apps, 2023), que permite el control de la soldadora de punto a través de un dispositivo móvil. Esta interfaz se instala en el teléfono inteligente y mediante el uso del protocolo Bluetooth, puede enviar la información requerida para hacer el punto de soldadura. La interfaz de la aplicación se muestra en la Figura 15, y los botones de control para los ejes Z, Y y X. Además, se implementó un botón de detención para interrumpir todas las operaciones.

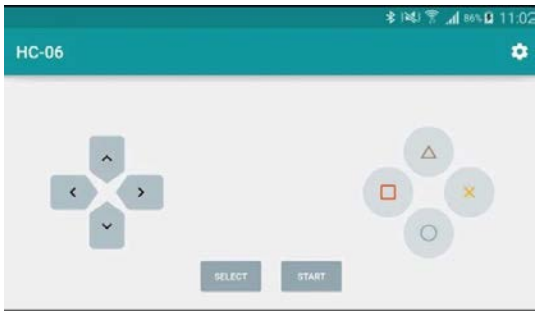


Figura 15. Pantalla principal de aplicación desarrollada

ISSN: 2992-8338

Finalmente, se armó el prototipo tal y como se muestra en la figura 16. En este caso, los dos electrodos que se pueden ver, son los que al entrar en contacto con las piezas de metal que se quieren unir, cierran el circuito, generan el paso de la corriente y al generarse calor, funden el metal en cierto instante de tiempo para obtener la unión de las dos piezas.

Figura 16. Eje x Posición 1

En la figura 17 se observan las pruebas de soldado con una pequeña lamina para poder calibrar la potencia con la que se va a hacer el punto, esto es debido que es requerido aplicar una corriente adecuada a las láminas con el fin de asegurar la unión de ellas.. Una vez realizada esta prueba, se pudo observar que la unión generada a través de este proceso fue aceptable

Figura 17. Calibración de potencia

En la figura 18 se observa la prueba del movimiento en el eje z con la camilla para evitar accidentes. Estas pruebas aseguraron el correcto funcionamiento del artefacto en su totalidad.

Figura 18. Prueba de movimiento en eje Z

La realización del prototipo se consideró exitosa, cumpliendo con todos los objetivos establecidos. A pesar de los desafíos encontrados durante el proceso. No se encontraron problemas significativos en el sistema de control, la potencia de soldado ni en los movimientos de los ejes del producto final entregado (Ver figura 19).

Figura 19. Pruebas finales realizadas

Este prototipo de soldadora semiautomática cuenta con una potencia máxima de 5000 Watts, con la cual puede soldar aluminio, acero inoxidable, latón, bronce, cobre entre muchos otros materiales que componen las chapas / planchas metálicas con un espesor no mayor a 2 mm en un tiempo aproximado de 1 a 3 segundos según el espesor de la chapa.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, los objetivos específicos planteados se alcanzaron gracias al esfuerzo y dedicación dedicados a este proyecto. Se adquirieron y aplicaron conocimientos fundamentales en electrónica, control, mecánica y programación. Además, se determinaron los componentes del mercado adecuados para la construcción del prototipo y se desarrolló un sistema de control que automatiza las operaciones de la soldadora, asegurando su eficiencia y seguridad en el uso. Se exploraron mejoras para abordar problemas derivados de la problemática, demostrando un enfoque proactivo para la resolución de desafíos.

El objetivo general establecido en la sección de Introducción, que consistía en diseñar e implementar un prototipo de soldador de punto práctico, sencillo y seguro para el usuario, en el sentido de agregar una interfaz gráfica que permita al usuario alejarse un poco de la actividad en cuestión y evitar estar en contacto con los gases generados por el proceso. Se logró mediante la adquisición continua de conocimientos durante la ejecución del proyecto. Se realizaron propuestas innovadoras para hacer que el sistema fuera accesible, económico y eficiente, lo que fomentó el interés y la participación de las personas en la utilización de esta herramienta.

La realización de este proyecto permitió mejorar y consolidar los conocimientos en electrónica, mecánica y programación, especialmente al conectar el sistema a una aplicación para controlar la soldadora, lo cual fue una iniciativa novedosa. El desarrollo del sistema de control de los ejes cumplió con su objetivo, a pesar de tratarse de un prototipo, lo que implicó comprender los riesgos asociados y la complejidad del manejo de corrientes elevadas.

ISSN: 2992-8338

Es fundamental destacar que se seguirán buscando mejoras para este proyecto con el fin de abordar una mayor variedad de problemas en este ámbito. El proyecto no solo logró fomentar el interés por la seguridad al utilizar este tipo de herramientas, sino que también demostró el potencial de las tecnologías emergentes para mejorar la eficiencia y la seguridad en entornos industriales y domésticos. Como trabajo futuro, se realizaran más pruebas con el fin de validar los alcances del prototipo realizado.

REFERENCIAS

Aguirre J. M. and Baigorri, J. Electromandrino con control de fuerza axial para soldadura por fricción y otras aplicaciones, Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, Patente WO2013171355A1 (2013), 1-17

Arduino. ¿Que es Arduino?. (2023). Obtenido de la página de internet de la tarjeta de desarrollo Arduino. https://arduino.cl/que-es-arduino/

Chica, J. J. ; Aguilar, F.J. ; Marquinez B. and Villaran, A. Dispositivo avanzado para la formacion en soldadura basado en simulacion con realidad aumentada y actualizable en remoto, Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, Patente WO2013186413A1 (2013), 1-45

Dassault Systèmes. SOLIDWORKS 3D CAD (2023). Obtenido de la página de internet de la empresa Dassault Systèmes. https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad

Giumig Apps. Arduino bluetooth controller (2023). Obtenido de la página de internet de Google play. https://play.google.com/store/apps/developer?id=Giumig+Apps&hl=en&gl=US

Hopkins, T. Riesgos de salud ocasionados por humos de soldadura y cómo reducirlos. (2023). Obtenido de la página de internet de la empresa Nederman. https://www.nederman.com/es-mx/knowledge-center/welding-and-cancer

Labcenter Electronics. Proteus Circuit Simulation (2023). Obtenido de la página de internet de la empresa Labcenter Electronics. https://www.labcenter.com/simulation/

Texas Department of Insurance, Los Peligros Relacio-nados con la Soldadura, Programa de trabajo, Division of Workers' Compensation, 2022.

ISSN: 2992-8338

Robust Observer-Based Leader-Following Consensus Control Robust for Multi-Agent Systems to External Disturbances

Arturo D. Espinosa Pedroza *, **Jesus A. Vazquez Trejo** *, **Manuel Adam Medina** *, **Jarniel García Morales** *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*
e-mail:m22ce059@cenidet.tecnm.mx

Abstract:
This paper presents the design of a robust control applying the observer-based leader-follower technique for multi-agent systems exposed to external disturbances. The stability analysis and robustness strategy is by using the Lyapunov approach and an optimal H_∞ criterion. Consensus control is expressed in a set of linear matrix inequalities (LMI), which provide the controller and observer gains. A simulation is performed on a fleet of unmanned aerial vehicles (UAV) to external perturbations.

Keywords: Robust control, multi-agent systems , UAV, Leader-following,observer-based control, external disturbances.

1. INTRODUCCIÓN

Diversas investigaciones científicas, han demostrado que existe un interés particular en los sistemas multi-agente y su aplicación a diferentes campos (Li and Duan (2015)). El control cooperativo de sistemas multi-agente detona un sistema dinámico propicio para vehículos no tripulados: terrestres, acuáticos y aéreos. El control de formación líder-seguidor es una estrategia muy utilizada en la literatura (He et al. (2020)),en la que los agentes se consideran seguidores del líder virtual. Otra estrategia es la de basado en consenso (Rehan et al. (2020)), cuyo objetivo es que los agentes converjan a un valor común interactuando entre sí a través de una red de comunicación. El control del líder virtual se realiza generalmente para estabilizar su altitud (Ma'arif et al. (2023)). Un controlador PI con una planificación de trayectoria evita tener sobreimpulso en la altitud del UAV. En el proceso de vuelo real los UVA's son susceptibles a perturbaciones externas, causando pérdidas en la formación, las cuales puede provenir del cambiante entorno (Kadhim and Abdulsadda (2023)), que incluye el cambio en el viento (Trejo et al. (2021)), el ligero cambio del estado meteorológico de bruma y humedad. Por lo tanto, es muy importante realizar un control robusto basado en observador (Vazquez et al. (2023)) para minimizar los efectos de la perturbación externa. En (Chen et al. (2017)) diseñan un protocolo de consenso robusto para el sistema multi-agente utilizando valores estimados de estado. En la literatura se observa que los sistemas multi-agente son de interés para la comunidad de investigadores, el minimizar las perturbaciones en estos sistemas es importante para evitar colisiones entre los agentes y perder las formaciones.

La contribución en este trabajo es el diseño de un control robusto líder-seguidor basado en observador aplicado en el modelo matemático de una flotilla de UAV's que resuelve el problema de control de formación, la importancia de diseñar un control robusto es lograr minimizar las perturbaciones. Así mismo, se realizó un control PI para el líder virtual con una referencia adecuada para evitar tener sobreimpulso en la altitud. La ventaja de contar con un líder virtual es que los agentes lo seguirán y lograrán seguir teniendo la formación a pesar de un cambio de referencia.

2. BASES MATEMÁTICAS

En esta sección se hace mención de lemas y notación útiles para el desarrollo matemático de la deducción de la desigualdad matricial lineal (LMI). La matriz Hermitiana es denotada por $He\{M\} = M + M^T$. El producto Kronecker es denotado por el símbolo $\otimes$.

Lema 1 (Langville and Stewart (2004)): El producto Kronecker cuenta con las siguientes propiedades:

(1) $A \otimes (B + C) = A \otimes B + A \otimes C$
(2) $(A \otimes B)^T \otimes C = A^T \otimes B^T$
(3) $(kA) \otimes B = A \otimes (kB) = k(A \otimes B)$
(4) $(A \otimes B)\,(\mathrm{C} \otimes D) = (AC) \otimes (BD)$

Lema 2 (Chen et al. (2016)): Dada la matriz simétrica $\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{B}^T & C \end{bmatrix} < 0$, las siguientes expresiones son equivalentes.

(1) $\bar{A} < 0, \bar{C} - \bar{B}^T \bar{A}^{-1} \bar{B} < 0$ y $\bar{C} < 0, \bar{A} - \bar{B}^T \bar{C}^{-1} \bar{B} < 0$

Lema 3 (Kheloufi et al. (2013)) : Dadas las matrices X y Y de dimensiones apropiadas, para cualquier matriz invertible S y cualquier escalar$\mu > 0$ se tiene: $X^T Y + Y^T X \leq \mu X^T S X + \mu^{-1} Y^T S^{-1} Y$

Lema 4 (Li and Duan (2015)) : La matriz $\bar{\mathcal{L}}$ es definida positiva si y solo si el grafo **G** es conectado y cuenta con al menos un ***spanning tree*** indirecto.

ISSN: 2992-8338

Un grafo $\mathcal{G}$ es un par ordenado $(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ que consta de un conjunto de nodos finitos no vacíos $\mathcal{V} = \{v_1, \ldots, v_N\}$ y $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ es un conjunto de bordes de pares ordenados de nodos, llamados bordes. La matriz de adyacencias para la topología en la Fig. 6 definida como $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N\times N}$ asociada con el grafo $\mathcal{G}$ se define tal que $a_{ii} = 0$, $a_{ij} > 0$ si y solo si $(i, j) \in \mathcal{E}$ y de lo contrario $a_{ij} = 0$, y una matriz laplaciana definida como $\mathcal{L} = [\mathcal{L}_{ij}] \in \mathbb{R}^{N\times N}$ del grafo $\mathcal{G}$ se define como $\mathcal{L}_{ii} = \sum_{j\neq i} a_{ij}$ y $\mathcal{L}_{ij} = -a_{ij},\ i \neq j$.

3. POSICIONAMIENTO DEL PROBLEMA

El modelo dinámico de un sistema multi-agente con perturbación en la entrada tiene la siguiente representación:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t) + Dd_i(t), \\ y_i(t) &= Cx_i(t) \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

$x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector que representa a los estados de cada agente. $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entradas, $y_i(t) \in \mathbb{R}^o$ es el vector de salidas, $d_i(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de perturbaciones, el subíndice i representa el número de agentes N.

El modelo dinámico del líder-seguidor, se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \dot{x}_l(t) &= Ax_l(t) + Bu_l(t), \\ y_l(t) &= Cx_l(t) \end{aligned} \tag{2}$$

Donde: $x_l(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector que representa a los estados del líder. $u_l(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entradas.

Se define el error dinámico de sincronización:

$$\dot{\delta}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_l \tag{3}$$

Sustituyendo 1 y 2 en 3, se obtiene:

$$\dot{\delta}_i = A\delta_i + B(u_i(t) - u_l(t)) + Dd_i(t) \tag{4}$$

Se describe el siguiente control basado en observador (Trejo et al. (2021)):

$$u_i = K\left(\sum_{j\in N_i} a_{ij}(\hat{x}_i - \hat{x_j}) + \alpha(\hat{x}_i - x_l)\right) + u_l \tag{5}$$

Donde: $K \in \mathbb{R}^{mxn}$ es la ganancia del control.

3.1 Seguimiento de referencia del líder virtual

Se diseño un control (PI) de seguimiento de referencia para el líder virtual. El sistema en lazo cerrado, es descrito de la siguiente manera, considerando como ley de control $u_l = K_P(r - Cx_l) + K_I\xi$.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_l \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_PC & BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BK_P \\ I \end{bmatrix} r \tag{6}$$

Si $r = 0$, y reescribiendo (6) con un cambio de variable:

$$\dot{x}_l = \left(\bar{A} - \bar{B}\bar{K}\bar{C}\right)\bar{x}_l \tag{7}$$

Realizando un análisis de estabilidad mediante Lyapunov $V = \bar{x}_l^T P\bar{x}_l$ y su derivada $\dot{V} = \dot{\bar{x}}_l^T P\bar{x}_l + \bar{x}_l^T P\dot{\bar{x}}_l$.

Sustituyendo (7) en la derivada y realizando operaciones matemáticas se obtiene:

$$He\left\{\bar{A}\bar{P} - \bar{B}\Gamma\right\} < 0 \tag{8}$$

Donde: $\Gamma = \bar{K}\bar{C}\bar{P}$,$\bar{K} = \Gamma\bar{P}^{-1}\bar{C}^{-1}$ y $\bar{K} = -\begin{bmatrix} K_P & -K_I \end{bmatrix}$

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR BASADO EN OBSERVADOR LÍDER-SEGUIDOR

En esta sección se presenta el análisis de estabilidad utilizando el enfoque de Lyapunov. En la práctica se presenta el problema de no tener todas las salidas disponibles y/o contar con sensores que midan de una forma precisa las mismas, por ende se utiliza el siguiente observador para estimar los estados:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) &= A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + L(y_i(t) - \hat{y}_i(t)), \\ y &= Cx_i(t) \end{aligned} \tag{9}$$

Donde:

$\hat{x}_i(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de los estados estimados de agente i. $\hat{y}_i(t) \in \mathbb{R}^o$ es el vector de salidas.$L \in \mathbb{R}^{nxo}$ son las ganancias del observador.

El error dinámico de estimación se describe como:

$$\dot{e}_i = (A - LC)e_i + Dd_i(t) \tag{10}$$

Reescribiendo (5) en términos de los errores de estimación y de sincronización y sustituyendo en (4):

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i =& A\delta_i + Dd_i(t) \\ &+BK\left(\sum_{j\in N_i} a_{ij}(\delta_i - e_i - \delta_j + e_j) + \alpha(\sigma_i - e_i)\right) \end{aligned} \tag{11}$$

Definiendo $\delta(t) = [\delta_1(t)^T, \delta_2(t)^T, ..., \delta_N(t)^T]^T$, aplicando el producto Kronecker a (11) y a (10), se tiene:

$$\dot{\delta} = (I_N \otimes A + \bar{\mathcal{L}} \otimes BK)\delta - (\bar{\mathcal{L}} \otimes BK)e + (I_N \otimes D)d \tag{12}$$

$$\dot{e} = (I_N \otimes (A - LC))e + (I_N \otimes D)d \tag{13}$$

Definiendo el siguiente vector $Z = [\delta^T, e^T]^T$. Considerando el siguiente lazo cerrado para un sistema multiagente:

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}d \tag{14}$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} I_N \otimes A + \bar{\mathcal{L}} \otimes BK & -\bar{\mathcal{L}} \otimes BK \\ 0 & I_N \otimes (A - LC) \end{bmatrix}, \text{D=} \begin{bmatrix} I_N \otimes D \\ I_N \otimes D \end{bmatrix}$$

4.1 Análisis de estabilidad

En esta sección se presenta el análisis de estabilidad del sistema en lazo cerrado mediante Lyapunov. Se define la

ISSN: 2992-8338

función candidata de Lyapunov como $V = z^T Pz$ y su derivada $\dot{V} = 2z^T P\dot{z}$. Definiendo $P = diag(I_N \otimes P_1, I_N \otimes P_2)$. Realizando operaciones matemáticas se obtiene:

$$\begin{aligned}\dot{V} =& 2\delta^T(I_N \otimes P_1 A + \bar{\mathcal{L}} \otimes P_1 BK)\delta \\ & -2\delta^T(\bar{\mathcal{L}} \otimes P_1 BK)e + 2e^T(I_N \otimes P_2(A - LC))e \\ & +2\delta^T(I_N \otimes P_1 D)d + 2e^T(I_N \otimes P_2 D)d\end{aligned} \quad (15)$$

Se define el siguiente cambio de coordenadas:

$$\varphi = (T^T \otimes I_N)\delta, \phi = (T^T \otimes I_N)e, \theta = (T^T \otimes I_N)d \quad (16)$$

Donde: $T \in \mathbb{R}^{NxN}$ es la transformación lineal a partir de los eigenvectores asociados de la matriz Laplaciana $\tilde{\mathcal{L}} = T^T JT$ con $J = diag(\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N)$

Reescribiendo (15) considerando el cambio de coordenadas (16):

$$\begin{aligned}\dot{V} =& 2\varphi^T(I_N \otimes P_1 A + \bar{\mathcal{L}} \otimes P_1 BK)\varphi \\ & -2\varphi^T(\bar{\mathcal{L}} \otimes P_1 BK)\phi + 2\phi^T(I_N \otimes P_2(A - LC))\phi \\ & +2\varphi^T(I_N \otimes P_1 D)\theta + 2\phi^T(I_N \otimes P_2 D)\theta\end{aligned} \quad (17)$$

Aplicando el Lema 4 en (17), es reescrito como:

$$\begin{aligned}\dot{V} =& \sum_{j=1}^{N} \varphi_j^T He\{P_1 A + \lambda_j P_1 BK\}\varphi_j \\ & - 2\sum_{j=1}^{N} \varphi_j^T(\lambda_j P_1 BK)\phi_j + 2\sum_{j=1}^{N} \varphi_j^T(P_1 D)\theta_j \\ & + \sum_{j=1}^{N} \phi_j^T He\{P_2(A - LC)\}\phi_j + 2\sum_{j=1}^{N} \phi_j^T(P_1 D)\theta_j\end{aligned} \quad (18)$$

Considerando la teoría de control robusto como lo reportan en [ref], la ganancia L_2 de $d(t)$ a $z(t)$ debe ser menor o igual que γ, por ende, la siguiente desigualdad se mantiene:

$$||z(t)||^2 \leq \gamma^2 ||d(t)||^2 \quad (19)$$

Índice de desempeño acorde con (18)

$$S_T \leq \int_0^\infty \sum_{j=1}^{N} (\varphi_j(t)^T \varphi_j(t) + \phi_j(t)^T \phi_j(t) - \theta_j(t)^T \theta_j(t) + \dot{V})\, dt \quad (20)$$

La finalidad de (20) es minimizar los efectos de las perturbaciones. Definiendo el siguiente vector: $\beta_j(t) = [\varphi_j^T(t), \phi_j^T(t), \theta_j^T(t)]^T$. Sustituyendo (18) en (20), se obtiene:

$$J_T \leq \sum_{j=1}^{N} \beta_j(t)^T \Omega_j \beta_j(t) \quad (21)$$

Donde:

$$\Omega_j = \begin{bmatrix} He\{P1_A + \lambda_j P_1 BK\} + I & -(\lambda_j P_1 BK) & P_1 D \\ * & He\{P2(A - LC)\} + I & P_2 D \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \quad (22)$$

Pre y Post multiplicando (22) por $diag(\bar{P}_1, I_{nxn}, I_{mxm})$ y aplicando la relación de Young (Lema 3), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} He\left\{A\bar{P}_1 + \lambda_j BK\bar{P}_1\right\} + \bar{P}_1\bar{P}_1 & 0 & D \\ * & He\{P_2(A - LC)\} + I_{nxn} & P_2 D \\ * & * & -\gamma^2 I_{mxm} \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} -\lambda_j BK \\ 0_{nxn} \\ 0_{mxn} \end{bmatrix} \bar{P}_1 \begin{bmatrix} -\lambda_j BK \\ 0_{nxn} \\ 0_{mxn} \end{bmatrix}^T + \mu^{-1} \begin{bmatrix} 0_{nxn} \\ I_{nxn} \\ 0_{mxn} \end{bmatrix} \bar{P}_1 \begin{bmatrix} 0_{nxn} \\ I_{nxn} \\ 0_{mxn} \end{bmatrix}^T < 0 \quad (23)$$

Utilizando el complemento de Schur en (23).

$$\begin{bmatrix} w_j & 0_{nxn} & D & -\lambda_j BK\bar{P}_1 & 0_{nxn} \\ * & q_j & P_2 D & 0_{nxn} & I_{nxn} \\ * & * & -\gamma^2 I_{mxm} & 0_{mxn} & 0_{nxn} \\ * & * & * & -\mu^{-1}\bar{P}_1 & 0_{nxn} \\ * & * & * & * & -\mu\bar{P}_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

Donde: $w_j = He\left\{A\bar{P}_1 + \lambda_j N\bar{P}_1\right\} + \bar{P}_1\bar{P}_1$
$q_j = He\{P_2 A - MC\} + I_{nxn}$

Realizando un cambio de variable, para evitar bilinealidades: $N = K\bar{P}_1$ y $M = P_2 L$.

Teorema 1 (Trejo et al. (2021)): Considere el sistema en lazo cerrado en (14), dados los eigenvalores $\lambda_j(\bar{\mathcal{L}}), j = 1, 2, .., , N$; si existen matrices $\bar{P}_1 = \bar{P}_1^T{}_1 > 0, P_2 = P_2^T > 0$, N,M y el escalor $\mu > 0$ tal que la desigualdad 24 se cumpla minimizando γ según (19). La ganancia del observador y control pueden ser calculadas.

5. EJEMPLO NUMÉRICO: CUADRICÓPTERO

En esta sección se presenta un ejemplo numérico para mostrar la efectividad del control robusto aplicado a un grupo de UAV's. El modelo matemático no lineal del cuadricóptero: [Trejo et al. (2023)]:

$$\begin{aligned}\dot{p}_x &= v_x, \\ \dot{p}_y &= v_y, \\ \dot{p}_z &= v_z, \\ \dot{v}_x &= (cos(\psi)sen(\theta)cos(\phi) + sen(\psi)sen(\phi))\frac{1}{m_s}u_{z,}, \\ \dot{v}_y &= (sen(\psi)sen(\theta)cos(\phi) - cos(\psi)sen(\phi))\frac{1}{m_s}u_z, \\ \dot{v}_z &= -g + (cos(\theta)cos(\phi))\frac{1}{m_s}u_z, \\ \dot{\phi} &= p + (sen(\phi)tan(\theta))q + (cos(\phi)tan(\theta))r, \\ \dot{\theta} &= cos(\phi)q - sen(\phi)r \\ \dot{\psi} &= (sen(\phi)q - cos(\phi)r)\frac{1}{cos(\theta)} \\ \dot{p} &= (qr(J_y - J_z) + u_\phi)\frac{1}{J_x} \\ \dot{q} &= (pr(J_z - J_x) + u_\theta)\frac{1}{J_y} \\ \dot{r} &= (pq(J_x - J_y) + u_\psi)\frac{1}{J_z}\end{aligned} \quad (25)$$

El vector de estados para el sistema es definido como: $x = [p_x, \dot{p}_x, p_y, \dot{p}_y, p_z, \dot{p}_z, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}]$.

ISSN: 2992-8338

Las entradas del sistema para la dinámica de traslación y actitud son $u = [u_z, u_\phi, u_\theta, u_\psi]^T$. Las salidas del sistema son $y = [p_x, p_y, p_z, \phi, \theta, \psi]$.

El modelo lineal se deriva de la dinámica no lineal en generar el bucle de control de posición y orientación. Se consideran los siguientes suposiciones sobre el modelo de cuadricóptero no lineal.

- La variación alrededor de los ángulos de roll y pitch se considera muy pequeña y el ángulo de yaw se manteniendo constante.
- El coeficiente de resistencia d es insignificante al establecer una velocidad de rotación baja..
- Se considera que el dron esta en hover.La dinámica rotacional se puede simplificar considerando que $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}) \approx (p, q, r)$

La representación lineal del UAV tiene es la siguiente (Schacht et al. (2018)):

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= g\theta & \ddot{\phi} &= \frac{u_\phi}{Jx} \\ \ddot{y} &= -g\phi & \ddot{\theta} &= \frac{u_\theta}{Jy} \\ \ddot{z} &= \frac{u_z}{m_s} & \ddot{\psi} &= \frac{u_\psi}{Jz} \end{aligned} \tag{26}$$

6. RESULTADOS DEL EJEMPLO NUMÉRICO

En esta sección, el control de formación robusto líder seguidor basado en observador, se aplica a una flota de cinto agentes cuadricópteros homogéneos.Para resolver el control de formación basado en consenso la ley de control (5) se considera como:

$$u_i = K\left(\sum_{j\in N_i} a_{ij}(\hat{x}_i - H_i - (\hat{x}_j - H_j) + \alpha(\hat{x}_i - H_i - x_l)\right) + u_l \tag{27}$$

Los parámetros del UAV se describen en la Tabla 1 y condiciones iniciales en la Tabla 2.

Tabla 1.Parámetros mecánicos del dron modelo Quanser.

Parámetro	Valor	Unidad
Masa del dron, m_s	1.121	Kg
Gravedad, g	9.81	m/s^2
Momento de inercia sobre x, Jx	0.01	Kgm^2
Momento de inercia sobre y, Jy	0.0082	Kgm^2
Momento de inercia sobre z, Jz	0.0148	Kgm^2

Tabla 2.Condiciones iniciales de los agentes.

Agente	p_x	p_y	p_z	$\hat{p}_x$	$\hat{p}_y$	$\hat{p}_z$
1	6	-5	0	8	-3.5	0
2	3	-5	0	4	-7	0
3	0	-5	0	-1.5	-6	0
4	-3	-5	0	-4	-4	0
5	-6	-5	0	-8	-3	0

Las condiciones iniciales de las velocidades angulares y lineales de los agentes son cero.

La matriz H es la que restringe la formación de los agentes y tiene una forma $H = [h_1, h2, ..., h_N]^T$. Cada vector h_i contiene las distancias relativas que tendría cada agente i. Se define la matriz H para realizar la formación de un pentágono, los ceros añadidos permiten que sea de dimensiones apropiadas con el algoritmo de consenso (27):

$$H = 4 \cdot \begin{bmatrix} s(36) & s(108) & s(180) & s(252) & s(324) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c(36) & c(108) & c(180) & c(252) & c(324) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{28}$$

En la Fig. 6, se muestra la topología de comunicación.

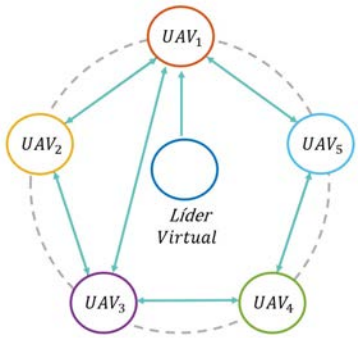


Fig. 1. Topología de comunicación entre agentes.

La comunicación con el líder virtual es denotada por $\Lambda = diag(1, 0, 0, 0, 0)$ En base a la topología de comunicación se obtiene la matriz Laplaciana:

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \tag{29}$$

Definiendo la matriz de perturbaciones D:

$$D = \begin{bmatrix} 1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix}^T, \tag{30}$$

Los valores de $\mu = 0.5$ (La variable de sintonización) y $\gamma = 10$ (de la minimización por H_∞ que se selecciona de tal forma que la desigualdad (19) se cumpla). Se resuelve la LMI mostrada en (24) mediante el software Matlab y el toolbox SDPT3. Para la sintonización del control KI del líder virtual y ganancias del control y observador del sistema multi-agente se utiliza el modelo lineal del cuadricóptero (26) .

ISSN: 2992-8338

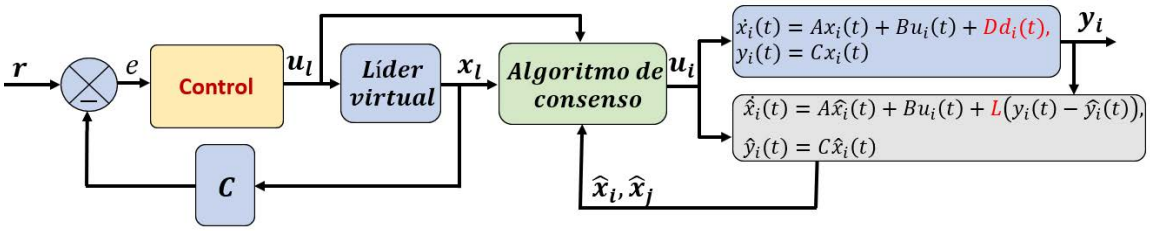


Fig. 2. Esquema de control.

Las perturbaciones se implementaron como una adición a las velocidades del modelo dinámico (25).

$$\begin{aligned} \dot{p}_x &= v_x + w_{xi}, \\ \dot{p}_y &= v_x + w_{yi}, \\ \dot{p}_z &= v_x + w_{zi}, \end{aligned} \tag{31}$$

Donde: w_{xi},w_{yi} y w_{zi} son las perturbaciones. Se define $d_i(t) = [w_{xi}, w_{yi}, w_{zi}, 0]^T$ como el vector de perturbaciones. A continuación, se muestran las magnitudes de las perturbaciones añadidas al sistema. El seguimiento

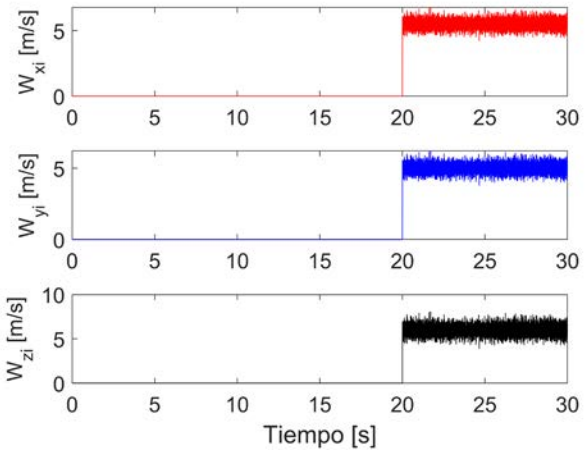


Fig. 3. Perturbaciones consideradas en la simulación.

de referencia para el líder, tiene el objetivo llegar a una altitud de 20 m y tener una trayectoria suave, para ello se utiliza la siguiente referencia (32):

$$\begin{aligned} z_{ref} =& z(0) + \left(\frac{10}{T^3}\right)(z(T) - z(0))\, t^3 - \left(\frac{15}{T^4}\right) \\ & (z(T) - z(0))\, t^4 + \left(\frac{6}{T^5}\right)(z(T) - z(0))\, t^5 \end{aligned} \tag{32}$$

Donde: $z(T) = 20$ es la posición final,$z(0) = 0$ es la posición inicial y $T = 5$ es el período de tiempo entre $z(0)$ y $z(T)$. Se considera la velocidad y aceleración igual a cero para asegurar trayectorias suaves. Las simulaciones se realizaron utilizando la dinámica no lineal mostrada en (25) y el esquema de control mostrado en Fig. 2.

En la Fig. 4 se muestra la trayectoria en el eje Z alcanzada con un control de formación clásico. El UAV dos es afectado por perturbación externa (3) provocando que se rompa la formación deseada.

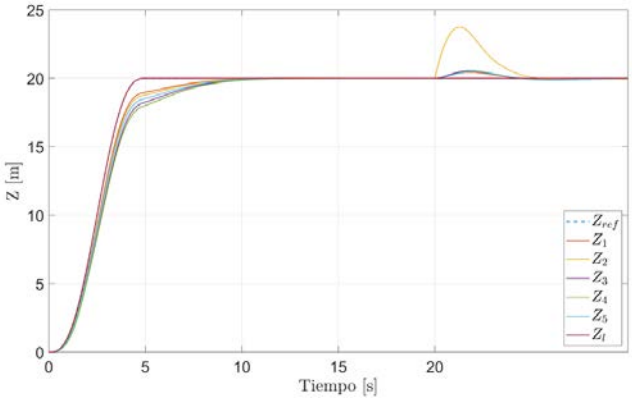


Fig. 4. Trayectorias en el eje Z de los agentes y líder.

En la Fig. 5 se muestra la trayectoria en el eje Z alcanzada aplicando el control robusto de formación. Se aprecia una mejora, los agentes 1,3,4 y 5 ya no presentan una afectación considerable en su posición deseada, en cuanto al agente afectado se disminuye el sobreimpulso en su altitud.

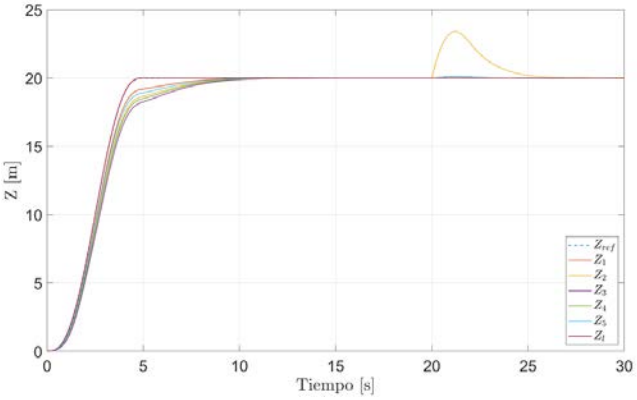


Fig. 5. Trayectorias en el eje Z de los agentes y líder.

En la Fig. 6 se muestra la formación alcanzada aplicando el control robusto. Se visualiza que el agente dos pierde la formación deseada y vuelve a ésta.

ISSN: 2992-8338

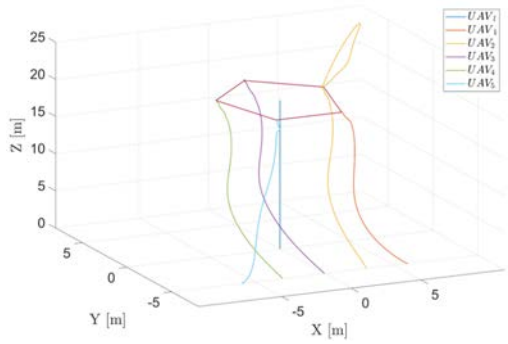


Fig. 6. Formación en perspectiva 3D.

El error de estimación se muestra en la Fig. 7, donde se visualiza la convergencia de los estados.

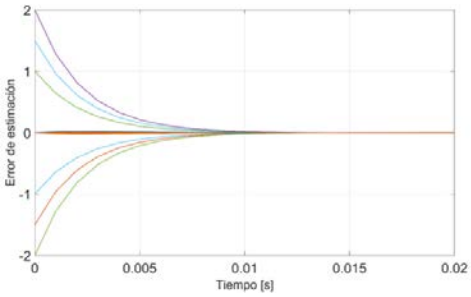


Fig. 7. Trayectorias en el eje Z de los agentes y líder.

7. CONCLUSIÓN

Se logró obtener las ganancias para el controlador y observador que minimizan los efectos de la perturbación, éstas se adquirieron resolviendo la LMI (24). Los resultados de la simulación con control robusto muestran la efectividad de H_∞ en comparación al control clásico. La formación deseada se logra recuperar después de la perturbación. La simulación muestra que los agentes logran seguir al líder virtual y se aprecia que la formación deseada se recupera después de la perturbación. En Fig.4 es notorio que la perturbación afecta la altitud de todos los agentes en comparación con Fig.6, que sólo afecta al agente perturbado. En futuros trabajos se pretende seguir sintonizando el diseño de ganancias, realizar pruebas con otro tipo de perturbaciones (Modelo de viento de Dryden).

REFERENCES

Chen, J., Zhang, W., Cao, Y.Y., Cai, Y., and Yao, L. (2016). Observer-based consensus control against actuator faults for linear parameter-varying multi-agent systems. In *2016 American Control Conference (ACC)*, 2832–2839. 10.1109/ACC.2016.7525348.

Chen, J., Zhang, W., Cao, Y.Y., and Chu, H. (2017). Observer-based consensus control against actuator faults for linear parameter-varying multi-agent systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(7), 1336–1347. 10.1109/TSMC.2016.2587300.

He, M., Mu, J., and Mu, X. (2020). H leader-following consensus of nonlinear multi-agent systems under semi-markovian switching topologies with partially unknown transition rates. *Information Sciences*, 513, 168–179. https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.11.002.

Kadhim, E.H. and Abdulsadda, A.T. (2023). Improving the size of the propellers of the parrot mini-drone and an impact study on its flight controller system. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 3(2), 171–186. 10.31763/ijrcs.v3i2.933.

Kheloufi, H., Zemouche, A., Bedouhene, F., and Boutayeb, M. (2013). On lmi conditions to design observer-based controllers for linear systems with parameter uncertainties. *Automatica*, 49(12), 3700–3704. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.09.046.

Langville, A.N. and Stewart, W.J. (2004). The kronecker product and stochastic automata networks. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 167(2), 429–447. https://doi.org/10.1016/j.cam.2003.10.010.

Li, Z. and Duan, Z. (2015). *Cooperative control of multi-agent systems: a consensus region approach.* CRC Press.

Ma'arif, A., Suwarno, I., Nur'aini, E., and Raharja, N.M. (2023). Altitude control of uav quadrotor using pid and integral state feedback. In *BIO Web of Conferences*, volume 65, 07011. EDP Sciences.

Rehan, M., Ahn, C.K., and Chadli, M. (2020). Consensus of one-sided lipschitz multi-agents under input saturation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(4), 745–749. 10.1109/TCSII.2019.2923721.

Schacht, R., Ponsart, J.C., Garcia-Beltrán, C., Astorga-Zaragoza, C., Theilliol, D., and Zhang, Y. (2018). Path planning generation algorithm for a class of uav multirotor based on state of health of lithium polymer battery. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 91. 10.1007/s10846-018-0870-0.

Trejo, J., Ponsart, J.C., Adam Medina, M., Valencia-Palomo, G., and Theilliol, D. (2023). Distributed observer-based leader-following consensus control for lpv multi-agent systems: Application to multiple vtol-uavs formation control. 1316–1323. 10.1109/ICUAS57906.2023.10156012.

Trejo, J.A.V., Rotondo, D., Medina, M.A., and Theilliol, D. (2021). Robust observer-based leader-following consensus for a class of nonlinear multi-agent systems: application to uav formation control. In *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1565–1572. 10.1109/ICUAS51884.2021.9476860.

Vazquez, J.A.T., Ponsart, J.C., Adam Medina, M., Valencia-Palomo, G., and Vazquez Trejo, J. (2023). *Distributed Observer-Based Leader-Following Consensus Control Robust to External Disturbance and Measurement Sensor Noise for LTI Multi-agent Systems*, 165–174. 10.1007/978-3-031-27540-1$_1$5.

ECONOMÍA SOCIAL SOLIDARIA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Flexibility of the teacher's schedule to participate in the nodes of the social and solidarity economy

Jorge Vera Jiménez

TecNM plantel Instituto Tecnológico de Oaxaca, Av. Ing. Víctor Bravo Ahuja 125,
Oaxaca, México, CP 68030, (e-mail: jorgeverajimenez@hotmail.com)

Abstract: In view of the harmful effects of the market economy based on the operation of private Abstract: companies, in which workers are not owners of the means of production, where most of the benefits are received by the owners of the means of production, the social economy is booming in the Mexican Republic; Nodes for the Promotion of the Social and Solidarity Economy have been created, formed by territorial alliances between governments of any hierarchy, Higher Education Institutions, and Organizations of the Social Sector of the Economy. It is a requirement that an educational institution belongs to the node; teachers are presented with the dichotomy of having to be in two places at the same time; in a fixed schedule they must be attending their responsibilities in front of the group in their institution where they were hired to provide their services; and in a variable schedule they must be present in work meetings called to deal with matters of the node of which their institution is a part. To make the rigid schedule of teachers inherent to the face-to-face educational modality of their institutions more flexible, a combination of educational modalities was made, which will allow them to attend to the needs they may have in the node, of their specialized technical knowledge; they will have the opportunity to efficiently and effectively fulfill their responsibilities both in their educational institution and in the node.
Keywords: Teacher; educational modality; social economy; flexible; rigid schedules; NODESS; solidarity

1. INTRODUCCIÓN

En la economía social se necesita de la participación de las instituciones educativas con el fin de apoyar a los colectivos organizados en sus diversas necesidades (Instituto, 2023a); sus docentes contribuirán a priorizar el uso de los recursos con un enfoque de sustentabilidad, proporcionarán asesorías que fomenten las acciones de emprendimiento, participarán en la identificación de áreas de oportunidad para la innovación, en general, coadyuvarán en la estructuración de las iniciativas de buscar soluciones a los problemas territoriales donde residan las organizaciones del sector social de la economía.

El personal docente de las Instituciones de Educación Superior (IES) presta sus servicios para contribuir a la formación de las competencias profesionales de los estudiantes; tienen un horario en el que se le le programa la atención de las asignaturas que conforman la currícula de la carrera de la disciplina en la que está contratado. El docente contribuye a formar el perfil profesional del egresado, que le permitirá incorporarse al aparato productivo fungiendo como proveedor de conocimientos eficaces para satisfacer las necesidades empresariales y sociales que requiera la participación de un profesional.

Le programan, al docente, asignaturas con la modalidad educativa presencial en un horario específico, le impide atender otras actividades de vinculación, hay rigidez en su disposición de su tiempo, debe estar personalmente en el aula el día y a la hora indicada para cada asignatura; tiene horas de asesorías para los estudiantes, prácticas de laboratorio, actividades en los talleres; son ocupaciones a realizar en un horario inamovible; esa situación lo constriñe a estar disponible en su institución educativa; le impedirá atender otro asunto tanto de vinculación como de investigación, fuera de su lugar de trabajo, por la falta de flexibilidad en su horario.

Por otro lado, para el fomento de la economía social en la República Mexicana, el Instituto Nacional de Economía Social (INAES) ha determinado la creación de Nodos de Impulso a la Economía Social y Solidaria (NODESS), conformado por la alianza territorial de alguna autoridad gubernamental de cualquier nivel, cuando menos una institución educativa y, organizaciones del sector social de la economía (Instituto, 2023b). Las instituciones educativas participan a través de su personal docente. Por las características de los asuntos, de los demás integrantes del NODESS, los tiempos para reunirse y tomar acuerdos dependerán de sus compromisos, no teniendo un horario definido. El docente, para participar en el nodo, deberá tener una disposición de tiempo flexible, dado que habrá reuniones continuamente a diferentes horas, posteriormente deberá estar atento a la demanda de sus asesorías, requerirá realizar investigación de campo que le obligará a salir de su centro de trabajo en el tiempo que tendrá asignadas actividades en su horario, impidiéndole salir de su institución educativa.

Habrá conflictos en las situaciones en las que, en el tiempo fijo del horario del docente de su institución educativa, tenga al mismo tiempo el compromiso de estar presente atendiendo algún asunto del NODESS; la solución a este conflicto implicará flexibilizar el horario del docente.

ISSN: 2992-8338

Por la función a favor del beneficio de la sociedad que tienen las IES, es imperiosa su participación en algún NODESS, por tal motivo fue necesario establecer una forma alternativa, en la que sus docentes puedan atender sus compromisos de contribuir a la formación de las competencias de los estudiantes, dándoles el espacio para que también puedan asesorar a los colectivos sociales, realizar los estudios destinados para determinar la factibilidad de implementación de los proyectos más convenientes; con la finalidad de que puedan colaborar eficientemente tanto en los NODESS, como en su institución educativa; evitándoles el traslape de los periodos en los que deberían estar atendiendo asuntos de ambas partes al mismo tiempo. Para que los docentes puedan compatibilizar los tiempos de sus dos compromisos, el de su IES y el NODESS, fue necesario hacer adecuaciones en la modalidad educativa presencial del plan de implementación de los cursos de sus asignaturas.

El Director General del TecNM participó en una reunión virtual denominada "Un NODESS en cada TecNM", el 7 de octubre del 2022, convocada por el Instituto Nacional de la Economía Social (INAES). En el encuentro el INAES, hizo una invitación para que se hicieran alianzas con organismos del sector social de la economía y con algún nivel de gobierno para que, de ser posible, se incrementare la cantidad de NODESS operando en la República Mexicana, donde participara cada uno de los Institutos Tecnológicos del país (TecNM, 2022). Los NODESS son una estrategia del INAES para fomento de la economía social y solidaria, dado que La ley de la Economía Social y Solidaria (Cámara, 2022) reglamentaria del Artículo 25 de la Constitucional Política de los Estados Unidos Mexicanos (Cámara, 2023) establece, que el INAE será el operador del impulso del bienestar de las organizaciones sociales.

Los NODESS tienen un ámbito territorial, en ellos participan IES´s de esa área geográfica, también pueden formar parte, de la alianza, IES's interesadas en contribuir a la solución de los problemas ubicadas en otra región. En Tijuana, el TecNM plantel Instituto Tecnológico de Tijuana está integrado en el NODESS Tijuana, Baja California Norte, conjuntamente con el Instituto Municipal de Participación Ciudadana, el Ayuntamiento de Tijuana y, la Unión Cooperativa de la Frontera Norte (Martínez, 2023); UPICCSA-IPN participa en otro NODESS; el TecNM plantel Instituto Tecnológico de Valles Centrales también está integrado en un NODESS, en varias partes de la república están operando, conformando la red nacional de NODESS.

A nivel internacional la ONU ha exhortado a sus países miembros a promover el desarrollo de la economía social en beneficio de los colectivos de personas organizadas que tienen un fin común, por los beneficios que les reporta a sus integrantes; los medios de producción les pertenecen a ellos, las utilidades son redistribuidas justamente a los participantes de la organización de sector social, sus integrantes están empleados en las empresas establecidas por el colectivo social, ellos se autogestiones, son autónomos, existe la democracia en la toma de decisiones el voto es por persona con valor unitario, la operación de sus negocios están fundamentados en la sustentabilidad (Organización, 2023).

Con el fin de flexibilizar el horario del docente, se analizaron las principales modalidades educativas utilizadas en el quehacer educativo; se tomaron en cuenta las diferentes formas en las que cada una desarrolla las sesiones de la práctica de la función de facilitar el aprendizaje, destinadas a la formación de las competencias del estudiante. Se eligieron aquellas que se consideró que generarían resultados eficaces, por ofrecer una manera de sustituir la presencia del docente ante una actividad frente al grupo de estudiantes. Dentro de ellas está la modalidad adoptada en alagunas escuelas y organizaciones japonesas, chinas y coreanas en las que se identifica a un estudiante (o trabajador) que funge como *Senpai* (Latina-a, 2023), quien es un estudiante (o un trabajador) que se ha capacitado previamente en la competencia correspondiente a su actividad desempeñada, a él se le asigna otro estudiante (o trabajador) para capacitarlo, se le llama *Kōhai (kouhai)*.

En una institución de educación suprior, se puede adoptar la modalidad la modalidad *Senpai-Kōhai*. Se elegirá al estudiante que tenga la habilidad de saber expresarse con propiedad y precisión para capacitarlo previamente en la competencia a desarrollar en cada tema de las asignaturas, el docente lo instruirá; cuando tenga la cualificación aceptable, le asignará a la totalidad de estudiantes del grupo, a él se le denominará el *Senpai*, tendrá que capacitar, a esos estudiantes a los que se les denominará *Kōhai* (Japonés, 2016). El docente, a la hora que él tenga disponible citará al estudiante *Senpai* para su capacitación; poniendo especial atención en no citarlo en las horas en las que podría haber ocupaciones en el NODESS.

Usando la tecnología de la información y comunicación (TIC), la modalidad educativa a distancia contribuye a que el docente pueda cumplir con el horario de estar frente a grupo de manera virtual; físicamente puede estar en el área territorial del NODESS en el que este participando y, los estudiantes estarán en la institución educativa en algún centro de cómputo, podrán usar alternativamente su celular o laptop para recibir instrucciones del docente.

Tomando en consideración las diferentes experiencias de algunas modalidades educativas en la manera de implementar la práctica docente, se hizo una combinación de ellas para flexibilizar el horario del docente para atender las asignaturas programadas, con el fin de que atienda cada una de las etapas del plan de implementación de los cursos

2. Materiales y métodos

Materiales. Los materiales utilizados para determinar las adecuaciones educativas a las labores académicas del docente, corresponden a medidas implementadas en la praxis que han reportado resultados exitosos, se refieren a las diferentes situaciones de modalidades educativas; la presencial requiere la interacción en el aula profesor estudiante; la realizada a distancia es usada para instruir, para exponer conceptos y explicar teorías por parte del docente; la desarrollada en línea

ISSN: 2992-8338

el estudiante lleva acabo su aprendizaje siguiendo las instrucciones registradas en una plataforma que contiene material del curso; la modalidad *Senpai y Kōhai,* es útil para realizar trabajos prácticos (Tabla 1).

Tabla 1. Materiales utilizados correspondientes a las modalidades educativas

Modalidad educativa presencial
Modalidad educativa a distancia; reconocida como *e-learning* por Boneu (2007)
Modalidad educativa en línea, reconocida como *mobile learning* por Pedrera (2015)
Modalidad educatva *Senpai y Kōhai* (Suárez, 2023)

Método. Los pasos utilizados en el método condujeron a la adecuación de la modalidad educativa presencial, conllevaron al diseño de una alternativa de combinación de modalidades educativas a implementar para flexibilizar el horario de los docentes, que les permitirá participar en un NODESS; les flexibilizará su horario.

Se plantearon dos fases, la primera correspondió a las "Modalidades educativas"; se eligieron las modalidades que son pertinentes para flexibilizar el horario de los decentes, que les permitirá cumplir con su responsabilidad de atender presencialmente a sus grupos de estudiantes inscritos en un programa educativo profesional; en la segunda fase, "Flexibilización del horario", por cada etapa del plan para implementar las actividades de las asignaturas de la carga de académica del docente, se identificaron las que se pueden adecuar para obtener un horario flexible y aquellas de las que no sería posible pero, el docente las podría atender a distancia y, finalmente aquellas actividades con rigidez de horario, en las cuales el docente deberá usar la modalidad educativa presencial (Tabla2)

Tabla 2 Etapas del método

Fase	Actividades
I Modalidades educativas	1 Identificación de las actividades que para el docente, requerirán una ocupación con modalidad educativa presencial por tener un horario fijo.
	2 Investigación de las modalidades educativas que permitirán flexibilizar el horario de los docentes con ocupación frente a grupo.
	3. Elección de las medidas educativas que ofrecen la oportunidad de flexibilizar horarios fijos.
II Flexibilización de horario	4 Definición de las etapas del plan del curso de los docentes.
	5 Identificación de las actividades, de cada etapa del plan del curso, en las cuales será factible implementar modalidad educativa que flexibilizarán el horario.
	6 Identificar las actividades que no podrán cambiar el horario fijo del docente, pero que será posible la aplicación de la educación a distancia.
	7 Identificación de las actividades en las que habrá rigidez de horario, el docente deberá estar presente en su IES.

Las modalidades educativas se eligieron tomando como referencia la naturaleza de las actividades del plan de implementación de los cursos; dependiendo de la necesidad de que el docente pudiera instruir a distancia a los estudiantes o de ser apoyado por un estudiante sobresaliente, se eligieron las modalidades "ad hoc" para cada etapa del desarrollo del curso.

3. RESULTADOS.

Para el cumplimiento de las responsabilidades del docente tanto en su IES, como en el NODESS donde colaborará, se adoptaron modalidades educativas en cada etapa del plan de sus asignaturas de las que será responsable. Las etapas más comunes son: encuadre, desarrollo y cierre (Tablas 3, 4 y 5). Se identificó en los tipos de horarios de las sesiones de educación a distancia, si la hora requiere de sincronía o podría ser asincrónica, es decir, si al mismo tiempo deben estar los actores o pueden cada una en momentos diferentes proporcionar y recibir la información.

En la etapa de encuadre, el docente requiere estar en el aula para interactuar con los estudiantes, en una sesión programada en un horario fijo se podrá cumplir con esa actividad. (Tabla 3)

Tabla 3. Etapa de encuadre

Actividad del plan del curso	Tipo de horario de las sesiones	Modalidad educativa	Actores
Bienvenida del docente a estudiantes y encuadre.	Fijo	Presencial	Docente Grupo de estudiantes

El estudiante adquirirá las competencias al realizar las actividades del plan del curso, estas se adquieren en la etapa de desarrollo: se inicia con la aplicación diagnóstica; mediante la aplicación de modalidades presenciales del docente con un estudiante denominado *Senpai*, en horario flexible, se capacitará el mismo para que sea el quien guie al grupo en la realización de las actividades, por cada competencia se tendrá una actividad de evaluación formativa del estudiante (Tabla 4).

Tabla 4. Etapa de desarrollo

Actividad del plan del curso	Tipo de horario de las sesiones	Modalidad educativa	Actores
Aplicación de evaluación diagnóstica	Flexible Asincrónica	A distancia	Estudiantes en la plataforma
	Fijo	Presencial	Senpai-

ISSN: 2992-8338

			Estudiantes Kōhai (Kouhai)
Formación de competencias del *Senpai* por el docente por cada tema del programa de estudios de cada materia.	Flexible	Presencial	Docente-Senpai
Formación de competencias del grupo de estudiantes por el *Senpai* por cada tema del programa de estudios de cada asignatura, cada asignatura tendrá un *Senpai*	Fijo	Presencial	*Senpai*-Estudiantes Kōhai
Disipación de dudas del grupo de estudiantes por el *Senpai*	Fijo	Presencial	Estudiantes-*Senpai*
Disipación de dudas del *Senpai*	Flexible Asincrónico	A distancia	Docente-*Senpai*
Disipación de dudas al grupo de estudiantes por el docente, que el *Senpai* no fue capaz de darles una respuesta satisfactoria previamente a sus preguntas	Fijo Sincrónico	A distancia	Docente-Estudiantes
Evaluación formativa	Flexible Sincrónico	A distancia	Estudiantes en la plataforma

En la etapa de cierre, el docente tendrá que estar presencialmente en una hora fija con los estudiantes para dar respuesta a las dudas y hacer un resumen del curso (Tabla 5).

Tabla 5. Etapa de cierre

Actividad del plan del curso	Tipo de horario de las sesiones	Modalidad educativa	Actores
Hacer resumen del curso, dar a conocer aspectos que se recomiende reforzar para mejorar las competencias formadas en el estudiantado y, disipar dudas generales del curso	Fijo	Presencial	Docente-Estudiantes
Evaluación sumatoria	Fijo Sincrónico	A distancia	Estudiante en plataforma
Evaluación de reacción	Flexible Asincrónico	A distancia	Estudiante en plataforma

Con la adopción de diversas modalidades educativas, solo en tres momentos del plan de sus cursos, el docente requerirá aplicar la modalidad educativa presencial; el primero sería en la etapa del encuadre, se presentará y se abocará a exponer los pormenores de las asignaturas; en la etapa de desarrollo estará con el grupo para disipar dudas, aquellas en las que el *Senpai* no haya tenido una respuesta satisfactoria para disolverlas; en la etapa de cierre, también estará con los estudiantes con el fin de hacer un resumen y dar respuestas a las inquietudes generales que vaya a plantear el estudiantado.

4. Conclusión.

La investigación generó una combinación de modalidades educativas que le permitirán al docente, tener un horario flexible, para poder participar con más libertad en los NODESS. Actualmente le es muy difícil asistir a las reuniones, debido a que tiene una carga de asignaturas en las que tiene que estar presente en su aula; al adoptar las modalidades educativas indicadas por cada etapa del plan de curso de sus asignaturas, el docente no tendrá la limitante de la rigidez de su estancia en su IES en un horario fijo. Al intervenir el docente en los NODESS, enriquecerá su experiencia, la podrá utilizar postreramente en sus cursos; tendrá ejemplos contextualizados de la aplicación del conocimiento en el entorno de los estudiantes, cuando los requiera, los podrá utilizar en el proceso de formación de sus competencias.

El estudiantado al poder verificar los resultados obtenidos del uso del conocimiento en casos reales de su entorno, incrementará su interés por profundizar en las técnicas, teorías métodos, normas, procedimientos requeridos para el alcance de las competencias específicas de su formación profesional.

Las Organizaciones del Sector Social de la Economía (OSSE), se verán favorecidas con un aprendizaje técnico al recibir del docente el conocimiento de los aspectos en los que se deberán aplicar métodos, procedimientos, o cualquier otro instrumento técnico o normativo; se concientizarán los miembros de las OSSE de la necesidad de recibir acompañamiento por medio de asesores profesionales que les ayuden con los pros y los contras de las acciones a implementar, para que puedan tomar las mejores decisiones que los conlleven a ser eficientes en sus trabajos y obtener

ISSN: 2992-8338

resultados eficaces en el uso de sus recursos, en los beneficios obtenidos y en la sustentabilidad..

En general, el país tendrá una múltiple variedad de generadores de autoempleo de los miembros de colectivos sociales emprendedores, asesorados por profesionales de las IES cuando los necesiten, dado que contarán con un horario flexible. Se fomentará la organización de la sociedad civil en colectivos para resolver problemas territoriales comunes.

El gobierno utilizará el presupuesto en necesidades sentidas de los colectivos sociales, dado que participará con ellos en la toma de decisiones en los NODESS.

5. Discusión.

Las áreas de las funciones sustantivas de un docente que presta sus servicios en una institución de educación superior son: educativa, investigación y vinculación, la rigidez del horario de la función educativa le restringe la libertad de participar en las otras dos funciones. El docente en su función de vinculación tiene el compromiso de integrarse a un NODESS, dado que el programa de Gobierno federal lo estipula, por lo que requiere libertad de acción en actividades de vinculación.

Los programas educativos de las carreras profesionales requieren adoptar modalidades que permitan el autodidactismo de los estudiantes, como el aprendizaje colaborativo, la socio formación o cualquier otra modalidad capaz de inducir al estudiantado a aprender a aprender, para que no sea dependiente de la modalidad presencial en la que, él sea un elemento pasivo receptor de información y, el docente el proveedor del conocimiento en un horario fijo para cada asignatura.

En la práctica del autodidactismo, el aprendizaje en red, puede ser un auxiliar en la modalidad en línea mediante la consulta a la inteligencia artificial, ésta apoyará en la disipación de dudas; el cuidado que se debe tener es el de advertir que no se busque la información en una aplicación de plataforma de inteligencia artificial gratuita, dado que contiene información no validada por expertos; actualmente se están ofreciendo plataformas que tienen un costo, su contenido está siendo revisado por profesionales especialistas en cada tema para garantizar la confiabilidad de la información.

El docente deberá ser un verificador del alcance de las competencias de los estudiantes; en caso de observar algunas deficiencias, podrá hacer sus recomendaciones para que se subsanen; los invitará a que analicen los resultados del NODESS en el que el docente esté participando. El maestro motivará a los estudiantes al mostrar la utilidad del conocimiento en la economía social solidaria; el estudiante verá, en forma real, los beneficios que genera la aplicación del conocimiento de su asignatura.

El docente deberá estar capacitado en el dominio de las diferentes modalidades educativas con la intención de que las use ante la diversidad de situaciones que se le puedan presentar, tanto en sus tareas educativas, como en sus compromisos al tener que atender el NODESS en el que participe. Ante todo, deberá motivar a los estudiantes a que trabajen en forma autónoma primero y, posteriormente, colectivamente con enfoque colaborativo, redundando en el enriquecimiento de lo que han aprendido; en las reuniones se retroalimentarán y reforzarán lo que han asimilado los estudiantes, conllevará a que haya diferentes profundidades de análisis del tema, diferentes dimensiones de la expresión de los problemas y de sus soluciones, distintas correlaciones con la realidad. Habrá antagonismos irreconciliables entre los estudiantes, donde necesariamente el docente deberá intervenir en la modalidad presencial, para que, con argumentos, con ejemplos, con datos obtenidos del contexto, pueda inducir a los estudiantes a que tengan un acuerdo, si no de consenso, si ecléctico; para ello el docente tendrá en su haber las experiencias que hubiere adquirido en el NODESS.

Referncias

Instituto Nacional de Economía Social. (2023). *Términos de referencia. Invitación pública 2023-2. Pre-NODESS*. 7. Sep. 2023.

Instituto Nacional de Economía Social. (2023). *Nodos de Impulso a la Economía Social y Solidaria NODESS*. 25. Ene. 2023. https://www.gob.mx/inaes/acciones-y-programas/nodos-de-impulso-a-la-economia-social-y-solidaria-nodess-233732

TecNM. (2022). *TecNM creará un NODESS en cada campus del país*. Reunión virtual “Un NODESS en cada TecNM” organizada por el INAES. 7. Oct. 2022. https://www.tecnm.mx/?vista=noticia&id=2856.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). *Ley de la Economía Social y Solidaria*. Diario Oficial de la Federación. 23. May. 2022.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2023). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Diario Oficial de la Federación. 5. Feb. 1917. Ultima reforma. 6. Jun. 2023.

Martínez, G. R. (2023). *Infografía NOESS Tijuana*. Publicada en el Diplomado de Economía Social y Solidaria por el TecNM. Módulo 4. Sep. 2023.

Organización Internacional del Trabajo. (2023*). La OIT acoge con satisfacción la nueva resolución de la ONU sobre economía social y solidaria*. 19. Abr. 2023. Ginebra, Suiza. https://www.ilo.org/global/about-the-ilo/newsroom/news/ WCMS_877430/lang--es/index.htm.

Latina-a .(2023). *Senpai – Kouhai, una jerarquía tradicional japonesa*. En línea. 26. Sep. 2023. https://latin-a.org/senpai-kouhai-una-jerarquia-tradicional-japonesa/

Japonés en la nube. (2016). *La relación Senpai – Kohai en Japón*. 25. Ene. 2016. https://japonesenlanube.com/blog-

ISSN: 2992-8338

sobre-el-idioma-japones/la-relacion-senpai-kohai-en-japon/

Boneu, Josep M. (2007). *Plataformas abiertas de e-learning para el soporte de contenidos educativos abiertos*. Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento. RUSC. Universities and Knowledge Society Journal, vol. 4, núm. 1, 2007, pp. 36-47 Universitat Oberta de Cataluny.

Pedrera Rodríguez, I; Revuelta Domínguez, F. I. (2015). *Mobile learning. Una propuesta de intervención para la igualdad de género en educación secundaria*. Universidad de Extremadura. Revista Qurriculum, 28; enero 2015, pp. 129-143; ISSN: 1130-5371

Suárez- Barraza, M. (2023) *Kaizen-21. The philosophy of continuous improvement and operational innovation in the new global environment*. Emerald Publishing Limited. First edition. Iwa, UK. 2

ISSN: 2992-8338

Review of the state of the art of the integration of data mining techniques in business process analysis

Emmanuel Rebolledo Torres*, Hugo Estrada Esquivel, Alicia Martinez Rebollar *****

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Palmira S/N. C.P. 62490, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, México.*

e-mail: m23ce036@cenidet.tecnm.edu.mx, hugo.ee@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx.

Abstract: At the present time, companies and public and private organizations are looking for effective methods to achieve their business objectives. In this context, disciplines such as Business Process Management (BPM) have emerged to provide assistance to entrepreneurs in the design, analysis and management of the processes needed to achieve these organizational objectives. The integration of data mining into these organizational disciplines allows companies to extract knowledge from their processes event logs and also to identify possible bottlenecks that could affect the achievement of the goals expected by the business. This paper presents a review of the state of the art of integrating data mining techniques into business process modeling and highlights the applications emerging from this convergence.

Keywords: *Business Process Management, Performance Indicators, Data Mining*

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de negocio se componen de una secuencia de actividades que permiten a una empresa alcanzar sus objetivos estratégicos. El éxito de estos procesos se mide a través de indicadores clave de rendimiento (KPI), los cuales evalúan y cuantifican el desempeño de las actividades en relación al cumplimiento de los objetivos estratégicos, es decir, comparan los resultados de un proceso ya ejecutado con los objetivos deseados por la organización (Giraldo, Jiménez, & Montoya, 2015).

Es fundamental que las empresas realicen un análisis de sus procesos para identificar problemas y monitorear el comportamiento de las actividades en ejecución (zur Muehlen & Shapiro, 2015). Sin embargo, analizar los modelos de procesos empresariales de manera manual resulta una tarea compleja y costosa (Becker, Pfeiffer, Räquers, Falk, & Czerwonka, 2014). Además, la falta de información para los dueños de los procesos, es decir, aquellos que gestionan la ejecución de los procesos, representa un obstáculo para las organizaciones, ya que no pueden administrar correctamente la priorización de las tareas que componen sus procesos y les resulta complicado seleccionar sus indicadores de desempeño (Danilova, 2018). Por lo tanto, se han desarrollado disciplinas que permiten a las empresas formular estrategias para abordar estas problemáticas.

Este artículo aborda el análisis de trabajos de investigación que han identificado oportunidades y desafíos en la convergencia de la minería de datos y los procesos de negocio.

El artículo está organizado de la siguiente forma: La segunda sección presenta el marco teórico del trabajo, la tercera sección presenta la revisión del estado del arte, la cuarta sección presenta los hallazgos encontrados en el estado del arte. Finalmente, las conclusiones y trabajos futuros se presentan en el quinto segmento de este trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Gestión de procesos de negocio

La gestión de procesos de negocio (Business Process Management, BPM) es un conjunto de prácticas de análisis y gestión enfocado en los procesos empresariales, que ayuda a mejorar la eficiencia de los servicios que generan valor (Hitpass, 2017). BPM se centra en la administración de cadenas completas de eventos, actividades y decisiones que aportan valor a la empresa y a sus clientes (Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A., 2019). Esta disciplina se originó a partir de la convergencia de dos enfoques: la Reingeniería de Procesos de Negocio (Business Process Reengineering, BPR) y la Gestión de Calidad Total (Total Quality Management, TQM) (Gras, 2019).

La gestión de procesos de negocio propone una metodología que se detalla en la Figura 1.

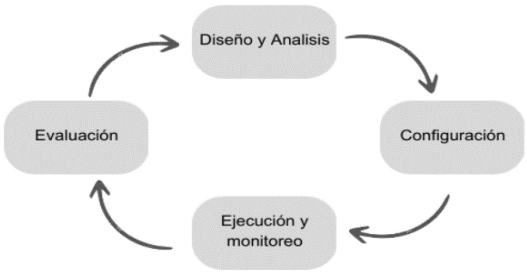


Figura 1. Metodología para la gestión de procesos de negocio

El ciclo de vida BPM comienza con la etapa de "Diseño y Análisis", que implica la identificación, revisión, validación y representación de los procesos en modelos. En la etapa de "Configuración", se adaptan los modelos a un software de gestión. El siguiente componente, "Ejecución y Monitoreo",

ISSN: 2992-8338

consiste en recopilar información de la ejecución de los procesos. Finalmente, en la etapa de "Evaluación", se utiliza la información recopilada para mejorar los procesos de negocio (Weske, 2007). Para modelar los procesos, se emplea la notación BPMN, que esquematiza el flujo de actividades necesarias para que una organización alcance sus objetivos, facilitando así la comprensión de los procesos.

2.2 Trazas de ejecución de modelos de negocio

Las trazas de ejecución representan la secuencia de sentencias o eventos que ocurrieron durante la ejecución de un proceso (Elsaka, 2017). A partir de estas trazas, es posible llevar a cabo el registro de eventos (Orellana, 2018). Los eventos están marcados con un timestamp (marca de tiempo) que define el momento en que inicia o termina cada evento (Van der Aalst, 2016).

A continuación, se muestra un ejemplo de un registro de eventos de un proceso extraído de Van der Aalst (2016).

Tabla 1. Registros de eventos extraído de Van der Aalst, 2016

ID Caso	ID Evento	Marca de tiempo	Actividad	Recurso
1	35654424	31-12-2010:10.06	Examinación profunda	Sue
	35654425	05-01-2011:15.12	Revisión de boleto	Mike
2	35654483	30-12-2010:11.32	Solicitud de registro	Mike
	35654484	30-12-2010:12.12	Revisión de boleto	Mike
3	35654521	30-12-2010:14.32	Solicitud de registro	Pete
	35654522	30-12-2010:15.06	Revisión de boleto	Mike

2.3 Minería de datos

La minería de datos se define de manera simple como el proceso de extracción y procesamiento del conocimiento a partir de un conjunto de datos (Saylam, R., & Sahingoz, O. K., 2013). Este conocimiento descubierto puede manifestarse en forma de relaciones, tendencias, patrones, trayectorias ocultas y comportamientos atípicos, y tiene como objetivo respaldar la toma de decisiones dentro de las organizaciones (García, M. J. S., de la Concepción Pérez de Celis Herrero, M., Olguín, G. E. M., & de Jesús, Y. L., 2017).

La minería de datos es conceptualizada por varios autores como un proceso (Bose & Mahapatra, 2001; Han, J., Kamber, M., & Mining, D., 2006; Pick, A., Vasilecas, O., Kalibatienė, D., & Rupnik, R., 2013). Este enfoque ha llevado al desarrollo de metodologías que permiten realizar la minería de datos de manera sistemática, lo que ayuda a las organizaciones a comprender el proceso de descubrimiento de conocimiento y proporciona una guía para la planificación y ejecución de proyectos (Moine, J. M., Haedo, A. S., & Gordillo, S. E., 2011).

Tabla 2. Metodologías de minería de datos (Moine, J. M., Gordillo, S. E., & Haedo, A. S., 2011)

Metodología	Descripción
KDD	El modelo afirma que la minería de datos corresponde a la fase del proceso donde se extraen patrones a partir de los datos.
SEMMA	Se centra de manera particular en cuestiones técnicas, dejando de lado las tareas relacionadas con la análisis y comprensión del problema que se está tratando.
Catalyst	Propone la creación de dos modelos: el Modelo de negocio y el Modelo de explotación de datos.
CRISP-DM	Establece un conjunto de tareas y actividades para cada fase del proceso de minería.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

La presente revisión de literatura fue motivada por la siguiente pregunta de investigación:

- ¿Cuáles son las aplicaciones y enfoques de la minería de datos para el análisis de los datos provenientes de procesos de negocio?

Para realizar la búsqueda de los trabajos relacionados a la pregunta de investigación se utilizaron las fuentes: Google académico y ELSEVIER. Además, se utilizaron las siguientes cadenas de búsqueda:

- **A:** "Business Process" AND "Data mining"
- **B:** "Business Process Management" AND "data mining" AND "Key Performance Indicator"

Se recopilaron veinticuatro trabajos para la cadena de búsqueda A y veintitrés para la cadena B. Por consiguiente, se utilizaron los siguientes criterios de exclusión: páginas web, capítulos de libros, investigaciones que no mostraban un caso de estudio e informes para propósitos de titulación. En cuanto a los criterios de inclusión, se seleccionaron artículos relevantes que contrastaban con la aplicación de minería de datos en procesos de negocio, con casos de estudio reales, y se eligieron estudios en el periodo de 2017-2023. Como resultado treintaiocho trabajos fueron descartados del estudio y nueve artículos fueron seleccionados para su análisis. A continuación, se presenta el análisis de cada uno de los artículos seleccionados.

Delgado, A., Calegari, D., Marotta, A., González, L., & Tansini, L. (2021) proponen una metodología llamada PRICED (Process and Data sCience for oRganIzational improvEment) para llevar a cabo esfuerzos de minería y análisis de procesos y datos en organizaciones con el objetivo de mejorar sus operaciones basándose en evidencia. La metodología se centra en la integración de datos de procesos y datos organizacionales en una vista unificada, lo que permite

ISSN: 2992-8338

aplicar técnicas de minería de procesos y datos en el mismo conjunto de datos integrados. La metodología PRICED se organiza en disciplinas que abarcan la extracción e integración de datos, la mejora de la calidad de los datos, la preparación de datos, la minería y análisis de datos, y el cumplimiento de procesos. Cada disciplina involucra roles específicos y utiliza artefactos definidos. Además, la metodología se divide en fases, como la fase de Datos y la fase de Minería/Análisis, con el propósito principal de ofrecer a las organizaciones la inteligencia empresarial basada en evidencia necesaria para mejorar sus operaciones diarias. El artículo toma como caso de estudio el proceso de movilidad de los estudiantes de la universidad de la república de Montevideo, en donde se demostró que la metodología puede identificar problemáticas en la implementación de los procesos.

En el trabajo de Midden, J. H. (2021) se proponen métodos para utilizar la minería de procesos y el análisis de registros de eventos con el fin de asistir a los tomadores de decisiones en el entorno empresarial, reduciendo las opciones consideradas y mejorando el rendimiento general de la empresa. Además, señalan que la toma de decisiones estratégicas en el ámbito de los negocios puede resultar desafiante debido a restricciones de tiempo y recursos. La minería de procesos se emplea comúnmente en el análisis y la gestión de procesos empresariales, aunque suele enfocarse principalmente en asuntos de rendimiento y cumplimiento normativo.

Dentro de los métodos propuestos por los autores se incluye la identificación de los indicadores clave de desempeño relevantes para la logística de la empresa, el análisis de los registros de eventos, la aplicación de técnicas de minería de datos orientadas a los procesos comerciales, la evaluación de la conformidad y el rendimiento de los procesos, y la aplicación de métodos de eliminación de escenarios. Además, se presenta un caso de estudio en el que se llevaron a cabo tres experimentos para evaluar diferentes escenarios comerciales a lo largo del tiempo. En estos experimentos, se emplearon herramientas como Disco, que permite el análisis de registros de eventos y la creación de modelos de procesos, así como Python, para el procesamiento de datos y la ejecución de experimentos. Los experimentos se basaron en datos de registros de eventos recopilados en una fábrica y se llevaron a cabo en tres etapas, con la evaluación de diversos escenarios comerciales en cada una de ellas. Los resultados de estos experimentos indicaron que los escenarios de mejor rendimiento convergen hacia patrones similares, lo que sugiere que el análisis de registros de eventos puede ser de utilidad para los tomadores de decisiones en el ámbito empresarial.

El trabajo de Siek, M., & Mukti, R. M. G. (2021) se centra en la aplicación de técnicas de minería de procesos en el ámbito de la industria del comercio electrónico. El objetivo principal del artículo es llevar a cabo un análisis de los datos de registros de eventos de una empresa de comercio electrónico mediante el empleo de algoritmos de minería de procesos, tales como el inductive miner y el fuzzy miner. A través de este análisis, se generan modelos de procesos específicos para el comercio electrónico y se verifica su conformidad con los procesos estandarizados. El artículo también identifica problemáticas particulares que afectan a la industria del comercio electrónico, como la integración de sistemas, la realización de procesos manuales, la verificación manual de pagos y la cancelación de pedidos, especialmente en el caso de pagos contra reembolso. Para llevar a cabo este análisis y modelización de los procesos comerciales a partir de los datos de eventos, se emplean herramientas como Disco, Pro-M y Rapidminer Pro-M.

En resumen, el artículo subraya la utilidad de la minería de procesos en la resolución de problemas específicos en la industria del comercio electrónico, lo que permite llevar a cabo mejoras continuas en los procesos empresariales. Estas mejoras incluyen la automatización de la auditoría en tiempo real y la reingeniería de procesos.

Elhadjamor, (2019) documenta el procedimiento de la extracción de conocimiento mediante un software BPMS y la minería de indicadores clave para la mejora del proceso de atención médica del departamento de emergencias de un hospital. El proceso estudiado registra cien eventos de la ejecución del proceso en el software jBPM y utiliza el software ProM para realizar la minería de procesos. El trabajo acentúa que existen diversas maneras de explotar las herramientas de los softwares para mejorar la obtención e interpretación de la información obtenida y así mejorar los procesos e indicadores de desempeño. Es destacable que realiza minería a los indicadores de desempeño con el fin de que el responsable de la toma de decisiones se le facilite evaluar el desempeño de los procesos y tomar acciones para mejorarlo. Los resultados de este trabajo de investigación muestran que al realizar un análisis a los indicadores de desempeño es posible mejorar el proceso de negocio que se estudia desde una perspectiva desde su organización, comportamiento e información. Por ejemplo, la mejora del proceso de negocio puede referirse a la asignación de tareas de las personas que las ejecutan, el orden en que deben cumplirse las tareas o datos de entrada que se tendrán en cuenta para tareas específicas.

En el trabajo de Djenouri , Belhadi, & Fournier-Viger, (2018) se presenta un método con un enfoque de análisis de registro de eventos mejorado llamado AllMining, el cual construye diversas bases de datos de transacciones de un mismo registro de eventos al aplicar transformaciones en los datos para obtener patrones y correlaciones de los registros de los eventos de los procesos de negocio con técnicas de Frequent Itemset Mining (FIM). La herramienta Allmining tiene tres componentes:

1. Preprocesamiento: Esta etapa transforma el registro de los eventos en una forma adecuada para los análisis. Se divide en dos fases:
    1.1. Crear registros categóricos del registro de los eventos.
    1.2. Crear distintas bases de datos transicionales del registro de eventos.

2. Minería de conjuntos de datos frecuentes: En esta etapa se aplican técnicas de minería de conjuntos frecuentes a las bases de datos de los registros de eventos para extraer conjuntos de elementos frecuentes.

3. Descubrimiento de conocimiento: En esta etapa se aplica una nueva estrategia de poda heurística la cual está diseñada

ISSN: 2992-8338

para maximizar el número de registros cubiertos por un número mínimo de conjuntos de elementos frecuentes para preservar mucha información de los procesos de negocio y reducir el número de patrones finales. Se concluye que esta herramienta muestra un enfoque que permite el descubrimiento proactivo de conocimiento en un registro de eventos, lo que puede desencadenar una mayor investigación, como la identificación de mejores prácticas o el rediseño de procesos.

Giraldo, Jimenez, & Tabares (2017) presentan un modelo de optimización de procesos de negocio mediante una revisión de literatura e iteraciones de un proceso en específico, donde se integran BPM, minería de procesos y modelado dimensional. El modelo se compone de cuatro componentes las cuales van coordinadas con el ciclo BPM:

1. Modelado de la organización: Las etapas de "Diseño y Modelamiento" del ciclo BPM se relacionan con este componente que se encarga de especificar las características de la organización, procesos, actividades y tareas.

2. Análisis de procesos: Las etapas de "Ejecución" y "Monitoreo" del ciclo BPM se relacionan con este componente que monitorea y evalúa las tareas, actividades, procesos e indicadores de desempeño de la organización.

3. Origen de datos: La etapa de "Ejecución" del ciclo BPM también se relaciona con este componente, este determina el conjunto de registros conformado por tareas y variables provenientes de los sistemas de información de la organización. Se aplica minería de procesos en este componente.

4. Optimización: La etapa de "Optimización" del ciclo BPM se relaciona con este componente, el cual consiste en realizar una revisión de los resultados y proponer planes de mejora.

El modelo se aplicó a un caso de estudio y los resultados arrojados resaltan la facilidad de descubrir el registro de los eventos de los procesos al integrar un modelo dimensional e identificar el estado de los procesos en función del comportamiento de las actividades del modelo organizacional.

En este artículo, Elhadjamor, E. A., & Ghannouchi, S. A. (2017) proponen un enfoque metodológico para gestionar los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) en el contexto de la medición del rendimiento de los procesos de negocios, con un énfasis particular en el sector de la atención médica. Este enfoque abarca la recopilación de datos cuantitativos y cualitativos relacionados con los procesos de atención médica, la creación de una ontología para representar los KPI y sus relaciones con las actividades del proceso, además de la aplicación de técnicas de minería de datos, específicamente el algoritmo Apriori, para identificar relaciones y patrones significativos en los datos. Para llevar a cabo este estudio, se emplearon herramientas tecnológicas como jBPM para la gestión de procesos y PostgreSQL como sistema de gestión de bases de datos.

Como resultado del análisis de datos, se descubrió una relación significativa entre el tiempo de espera antes del tratamiento por parte del personal médico y el tiempo de espera antes del tratamiento por parte del personal paramédico. Estos hallazgos proporcionaron información valiosa que se utilizó para tomar decisiones informadas destinadas a mejorar los procesos de atención médica y, en última instancia, aumentar la satisfacción de los pacientes.

Peral, J., Maté, A., & Marco, M. (2017) proponen una metodología para identificar indicadores clave de rendimiento (KPIs) utilizando técnicas de minería de datos. Los KPIs son fundamentales para evaluar el desempeño de una organización y tomar decisiones informadas. El artículo se enfoca en cómo encontrar KPIs relevantes cuando no existen listas predefinidas de ellos, lo que es común cuando se adoptan nuevas actividades o se exploran fuentes de datos desconocidas, como el Big Data.

La metodología propuesta por Peral, J., Maté, A., & Marco, M. consta de seis etapas: en la primera, se define y modela la estrategia empresarial, identificando objetivos comerciales y KPIs; en la segunda, se analizan los requisitos de los usuarios y partes interesadas; la tercera involucra el diseño del almacén de datos; en la cuarta, se definen y seleccionan KPIs candidatos y se crea un modelo multidimensional; la quinta etapa implica la aplicación de técnicas de minería de datos y visualización para analizar los KPIs y sus relaciones; y finalmente, en la sexta etapa, los KPIs se incorporan en paneles de control para el monitoreo continuo del desempeño y la toma de decisiones informadas.

El artículo presenta un caso de estudio en el que se aplican estas etapas a datos de MOOCs (Cursos Masivos Abiertos en Línea) y datos abiertos de la Universidad de Alicante. En el caso de estudio, se analizan datos de estudiantes y se aplican técnicas de minería de datos, como Support Vector Machines, Random Forest y redes neuronales, para identificar KPIs relacionados con el rendimiento estudiantil. Los resultados sugieren que factores como el número de créditos matriculados y la ubicación geográfica de los estudiantes pueden influir en los resultados académicos.

Jlailaty, D., Grigori, D., y Belhajjame, K. (2017) desarrollaron un marco de trabajo diseñado para extraer información relacionada con procesos comerciales de los registros de correos electrónicos con la menor intervención del usuario posible. Los correos electrónicos representan una fuente valiosa de datos sobre procesos comerciales, ya que a menudo involucran actividades complejas en contextos profesionales y personales. El estudio propone un enfoque de aprendizaje automático no supervisado Este marco de trabajo emplea técnicas como el clustering jerárquico y Word2vec para agrupar y etiquetar los correos electrónicos según los modelos de procesos comerciales y las actividades relacionadas. Se realiza una comparación entre dos métodos de medición de similitud textual: Latent Semantic Analysis (LSA) y Word2vec, y los resultados indican que Word2vec demuestra ser más eficaz.

Los correos electrónicos se organizan en función de su similitud y se subdividen en subgrupos que representan

ISSN: 2992-8338

distintos tipos de actividades comerciales. Estos subgrupos se etiquetan mediante el uso de n-gramas, lo que permite a los usuarios seleccionar las etiquetas más adecuadas para cada actividad. El artículo presenta diversas métricas de calidad, incluyendo el índice Rand, precisión, recall y pureza, utilizadas para evaluar la eficacia del proceso de clustering y sub-clustering. Los resultados demuestran que Word2vec supera a LSA en la mayoría de las métricas, respaldando su eficacia en la detección de similitudes textuales.

Además, se ilustra un caso de uso con datos de correos electrónicos de un estudiante de doctorado, en el cual se identifican procesos comerciales y se etiquetan las actividades relacionadas. Finalmente, se plantean posibles direcciones de investigación futura, como la identificación de procesos comerciales completos y la implementación de sistemas de recomendación para evitar repeticiones en los correos electrónicos.

5. DISCUSIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Los artículos revisados abarcan una amplia gama de sectores, desde la atención médica hasta el comercio electrónico y la educación. Esto resalta la versatilidad de las técnicas de minería de procesos y análisis de datos para aplicarse a diversos dominios. A continuación, se presentan las aplicaciones y enfoques encontrados en estos trabajos de investigación.

5.1 Aplicación de minería de datos en procesos para la mejora de operaciones empresariales

Delgado, Calegari, Marotta, González y Tansini (2021) proponen la metodología PRICED, que se centra en la integración de datos de procesos y datos organizacionales para ofrecer inteligencia empresarial basada en evidencia. Este enfoque proporciona a las organizaciones una base sólida para mejorar sus operaciones diarias. El caso de estudio en la Universidad de la República de Montevideo demuestra la eficacia de esta metodología. Por su parte, Giraldo, Jimenez y Tabares (2017) presentan un modelo de optimización de procesos de negocio que integra BPM, minería de procesos y modelado dimensional. Este trabajo destaca cómo la integración de un modelo dimensional facilita la identificación de eventos de procesos, lo que a su vez permite entender el estado de los procesos según el comportamiento de las actividades del modelo organizacional. Esta integración resulta útil para la mejora continua de los procesos empresariales y la toma de decisiones informadas. Además, el trabajo de Siek, M. y Mukti, R. M. G. (2021) destaca la utilidad de la minería de procesos para abordar problemáticas específicas que afectan a la industria del comercio electrónico, como la integración de sistemas, la realización de procesos manuales y la verificación manual de pagos. La aplicación de herramientas como Disco, Pro-M y Rapidminer Pro-M para el análisis y modelización de procesos a partir de datos de eventos permite realizar mejoras continuas en los procesos empresariales.

5.2 Aplicación de minería de datos en procesos para la mejora de indicadores de desempeño de los procesos

El enfoque presentado por El Hadjamor y Ghannouchi (2017) se centra en la gestión de KPIs en el contexto de la medición del rendimiento de los procesos de negocios, con énfasis en el sector de la atención médica. Este enfoque demuestra cómo la minería de datos puede aplicarse para identificar relaciones y patrones significativos en los datos relacionados con procesos de atención médica. Mientras que Peral, Maté y Marco (2017) proponen una metodología para identificar KPIs cuando no existen listas predefinidas, lo que es común en entornos con nuevas actividades o fuentes de datos desconocidas. Este enfoque aborda la importancia de definir KPIs relevantes para evaluar el desempeño de una organización.

5.3 Aplicación de minería de datos en procesos a partir del procesamiento del registro de eventos

Djenouri, Belhadi y Fournier-Viger (2018) presentan un método llamado AllMining que construye bases de datos de transacciones a partir de registros de eventos, lo que permite identificar patrones y correlaciones en los procesos de negocio. Este enfoque muestra cómo el preprocesamiento y la minería de conjuntos de datos frecuentes pueden ser aplicados de manera efectiva. El marco de trabajo desarrollado por Jlailaty, Grigori y Belhajjame (2017) para extraer información relacionada con procesos comerciales de correos electrónicos demuestra cómo se pueden aplicar técnicas de aprendizaje automático no supervisado, como el clustering jerárquico y Word2vec, para analizar grandes cantidades de datos no estructurados y extraer información valiosa sobre procesos comerciales.

5.4 Aplicación de minería de datos en procesos para la mejora de la toma de decisiones

Midden (2021) propone métodos para utilizar la minería de procesos y el análisis de registros de eventos en el entorno empresarial con el objetivo de mejorar el rendimiento general de la empresa. Se centra en la toma de decisiones estratégicas en el ámbito de los negocios y cómo la minería de procesos puede contribuir a este proceso. También, el enfoque propuesto por El Hadjamor & Ghannouchi (2017) proporciona información valiosa para la toma de decisiones destinadas a mejorar los procesos de atención médica. Además, otro trabajo de Elhadjamor (2019) demuestra mediante un caso de estudio que utilizando minería de datos en los registros de eventos se puede extraer información valiosa para los tomadores de decisiones. Las metodologías propuestas por Peral, Maté y Marco (2017) y Giraldo, Jimenez y Tabares (2017) también tienen un enfoque relacionado con la mejora de la toma de decisiones.

5. CONCLUSIONES.

El análisis de la literatura y la revisión de casos de estudio relevantes ha permitido obtener una respuesta clara a la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las aplicaciones y enfoques de la minería de datos para el análisis de los datos provenientes de procesos de negocio? De los cuarentaisiete trabajos analizados, nueve fueron seleccionados por cumplir

ISSN: 2992-8338

los criterios de inclusión al referirse al uso de técnicas de minería para el estudio de los datos de procesos de negocio.

Los hallazgos y conclusiones derivados de este trabajo destacan la diversidad de aplicaciones exitosas de la minería de datos en diversos contextos empresariales, tales como la aplicación de minera de datos para realizar mejoras operacionales o la mejora de indicadores de desempeño. Estos resultados ofrecen perspectivas valiosas para aquellos que buscan implementar la minería de datos como una herramienta integral en sus operaciones comerciales.

Uno de los hallazgos clave es que la integración de datos de procesos y organizacionales permite la creación de inteligencia empresarial basada en evidencia, lo que, a su vez, facilita la mejora continua de los procesos. La gestión de Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs) se ha convertido en una herramienta de mucha utilidad para la evaluación del desempeño de un proceso de negocio, por lo cual existen diversos trabajos de investigación que los utilizan como herramienta de evaluación de desempeño. La minería de datos ha demostrado ser efectiva en la identificación de relaciones y patrones en los datos relacionados con los procesos de negocio.

REFERENCIAS

Becker, J. et al. (2015) “Semantic business process modelling and analysis”, en Handbook on Business Process Management 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 187–217.

Bose, I. y Mahapatra, R. K. (2001) “Business data mining — a machine learning perspective”, Information & management, 39(3), pp. 211–225. doi: 10.1016/s0378-7206(01)00091-x.

Danilova, K. B. (2019) “Process owners in business process management: a systematic literature review”, Business process management journal, 25(6), pp. 1377–1412. doi: 10.1108/bpmj-05-2017-0123.

Delgado, A. et al. (2021) “A methodology for integrated process and data mining and analysis towards evidence-based process improvement”, en Proceedings of the 16th International Conference on Software Technologies. SCITEPRESS - Science and Technology Publications.

Dumas, M. et al. (2019) Fundamentals of business process management. Berlín, Alemania: Springer.

El Hadj Amor, E. A. y Ghannouchi, S. A. (2017) “Towards managing key performance indicators for measuring business process performance”, en Information Systems. Cham: Springer International Publishing, pp. 579–591.

Elsaka, E. (2017) “Fault Localization Using Hybrid Static/Dynamic Analysis. En A. Memon”, en Advances in computer, pp. 79–114.

García, M. J. S. et al. (2017) “Minería de Datos como Herramienta de Prevención de Muertes que Involucran Violencia Intrafamiliar en la Sociedad Mexicana”, INNOVACIONES TECNOLÓGICAS EN LAS CIENCIAS COMPUTACIONALES, p. 76.

Giraldo, J., Jiménez, J. y Tabares, M. (2015) “Integrating business process management and data mining for organizational decision making”, Research in Computing Science, 100(1), pp. 89–102. doi: 10.13053/rcs-100-1-8.

Gras, J. C. (2019) Modelando el negocio con BPM en el mundo real: Casos prácticos. Juan Carlos Gras.

Han, J., Kamber, M. y Mining, D. (2006) Concepts and techniques. Morgan kaufmann.

Hitpass, B. (2017) BPM: Business Process Management Fundamentos y Conceptos de Implementación.

Jlailaty, D., Grigori, D. y Belhajjame, K. (2017) “Mining business process activities from email logs”, en 2017 IEEE International Conference on Cognitive Computing (ICCC). IEEE.

Midden, J. H. (2021) Using process mining and event log analysis for better business strategy decision-making.

Moine, J. M., Haedo, A. S. y Gordillo, S. E. (2011) “Estudio comparativo de metodologías para minería de datos”, en XIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación.

Orellana García, A. (2018) “Otra revisión crítica de la minería de procesos, apuntando a los flujos de procesos hospitalarios”, Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 12(2), pp. 104–125.

Peral, J., Maté, A. y Marco, M. (2017) “Application of Data Mining techniques to identify relevant Key Performance Indicators”, Computer standards & interfaces, 50, pp. 55–64. doi: 10.1016/j.csi.2016.09.009.

Pick, A. et al. (2013) “On approach for the implementation of data mining to business process optimisation in commercial companies”, Technological and economic development of economy, 19(2), pp. 237–256. doi: 10.3846/20294913.2013.796501.

Saylam, R. y Sahingoz, O. K. (2013) “Process mining in business process management: Concepts and challenges”, en 2013 International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO). IEEE.

Siek, M. y Mukti, R. M. G. (2021) “Business process mining from e-commerce event web logs: Conformance checking and bottleneck identification”, IOP conference series. Earth and environmental science, 729(1), p. 012133. doi: 10.1088/1755-1315/729/1/012133.

van der Aalst, W. M. P. (2016) Process mining: Data science in action. 2a ed. Berlín, Alemania: Springer.

Weske, M. (2007) Business Process Management-Concepts, Languages. Architectures, Verlag. Berlin.

zur Muehlen, M. y Shapiro, R. (2015) “Business Process Analytics”, en Handbook on Business Process Management 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 243–263.

ISSN: 2992-8338

Brief Literature Review on Classical Intelligent Tutoring Systems

Magali García[,*], Miguel A. Couoh [**,*], Yasmín Hernández[*], Javier Ortiz[*], Arturo E. Mares[*]**

[*] *TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor. 62490 Mexico (e-mail: yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx,arturo.mg@cenidet.tecnm.mx).*

[**] *TecNM/Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, Tlaxcala, Tlax. 90122 Mexico (e-mail: sandra.gg@altiplano.tecnm.mx miguelangel.cn@altiplano.tecnm.mx).*

Abstract: The research on Intelligent Tutoring Systems began more than 50 years ago and they represent one of the most successful applications of artificial intelligence. They are computer-based educational systems that provides individualized instruction like that of a human tutor. Tutoring systems has evolved from a classical learning based solely on the knowledge the student has to a very detailed student model with includes affect, emotions, personality, motivation, self-efficacy, and other constructs which support an individualized instruction. The animated pedagogical agents provide tutoring systems with a face and allow a more natural interaction between tutoring systems and students. The potential of verbal and not verbal communication and several pedagogical theories has been explored in the research on tutoring systems. A brief review of classical and influential tutoring is presented, these systems represent the foundation on research on intelligent tutoring systems. Classical tutoring like Guidon and Andes are presented and major animated agents are demonstrated.

Keywords: Animated pedagogical agents, intelligent tutoring systems, literature review

1. INTRODUCCIÓN

Durante el comienzo de la tecnología y la inteligencia artificial se han desarrollado los sistemas tutores inteligentes, que son sistemas de cómputo que se realizan con la finalidad de coadyuvar en el quehacer de las personas que fungen tareas y/o funciones de tutor y así facilitar el aprendizaje de los estudiantes. Los sistemas tutores inteligentes son: un sistema de software que utiliza técnicas de inteligencia artificial para representar el conocimiento e interactúa con los estudiantes para enseñárselo.

Los sistemas tutores inteligentes aplican algunas técnicas de la inteligencia artificial, esto con el objetivo de dotar el sistema de una habilidad que solo los seres humanos poseen, "inteligencia", contribuyendo así a que estos sistemas identifiquen las falencias en el aprendiz y puedan reforzar el conocimiento en el transcurso del aprendizaje de cierta área de conocimiento. Diversos autores plantean una arquitectura de los sistemas tratados que se constituye de 4 módulos, estos son: 1) el módulo del experto o dominio, 2) el módulo del estudiante, 3) el módulo de instrucción o tutor,4) el módulo del ambiente o interface de usuario.

Los Sistemas Tutores Inteligentes comenzaron a desarrollarse en los años 80 y fueron diseñados con la idea de impartir conocimiento con base en alguna forma de inteligencia para guiar al estudiante en el proceso de aprendizaje. Su propósito es exhibir un comportamiento similar al de un tutor humano, que se adapte al comportamiento del estudiante, identificando la forma en que él mismo resuelve un problema para brindarle ayuda cuando cometa errores. Un tutor inteligente, por lo tanto, “es un sistema de software que utiliza técnicas de inteligencia artificial para representar el conocimiento e interactúa con los estudiantes para enseñárselo”. La inteligencia de estos sistemas radica en el conocimiento que tienen sobre la materia, sobre cómo enseñar y sobre el estudiante. Este último conocimiento le permite al Sistema Tutor Inteligente que cada una de sus acciones refleje las necesidades del estudiante.

2. ANTECEDENTES

En esta investigación se presentan la implementación de modelos son aplicados a diferentes sistemas tutor inteligente, tales que fueron realizados para tipos de aprendizajes referentes a varios esquemas, a continuación se muestran algunos de ellos.

2.1 Sistema Tutor Inteligente

Como los STI, buscan emular un tutor humano, por lo tanto, se ofrece la definición de este concepto. Un tutor es una entidad capaz de guiar o

ISSN: 2992-8338

modificar el comportamiento, actividad y desempeño de un estudiante o aprendiz.
Un sistema tutorial inteligente se define como: sistema computacional diseñado para impartir instrucción y apoyar inteligentemente los procesos de enseñanza aprendizaje mediante la interacción con el alumno. [2]

Un Sistema Tutor Inteligente se compone de una arquitectura de 4 módulos:

1) Módulo Experto: Conocido también como dominio es el conocimiento de dominio (o tópicos del tema que será enseñado), conocimiento que será introducido en el sistema y representará el conocimiento experto en el tema y las características de la resolución de problemas asociados.

2) Módulo estudiante: su función es capturar el entendimiento del aprendiz sobre el dominio.

3) Módulo Tutor: contiene las estrategias tutoriales e instrucciones indispensables. Estos módulos deben ajustarse a las necesidades del estudiante sin la intervención del tutor humano. El propósito principal de este módulo es reducir la diferencia del conocimiento entre el experto y el estudiante al mínimo (o a ninguna).

4) Módulo interfaz: gestiona la interacción de los otros componentes del sistema y controla la interfaz hombre/máquina (Cataldi & Lage, 2009, Urretavizcaya, 2001).

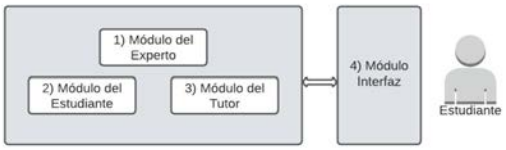


Figura 1. Arquitectura de un Sistema Tutor Inteligente.

2.2 Inteligencia Artificial en los Sistemas Tutores

Los sistemas tutores inteligentes (STI) representan una de las aplicaciones más exitosas de inteligencia artificial (IA); sin embargo, la interacción tutor-estudiante en muchos de estos sistemas ha sido poco natural, ya que obliga al estudiante a aprender la forma de comunicación del programa, lo que de alguna manera dificulta el aprendizaje. En los últimos años se han realizado algunos trabajos importantes en la investigación de la interacción hombre-máquina para dotarla de características similares a la interacción humana. Aunque algunos estudios demuestran la importancia de la comunicación no verbal, la mayoría de estos trabajos se han enfocado en la comunicación verbal. La tendencia principal ha sido el uso de lenguaje escrito y hablado y la aplicación de realidad virtual, y una de las tendencias más importantes ha sido la incorporación de agentes pedagógicos animados a los STI.

Recientemente, investigadores en ciencias computacionales han puesto su interés en el procesamiento de emociones, y tratan de explicar la interrelación entre las emociones y el aprendizaje. La comunicación es un aspecto importante en la tutoría y en el aprendizaje, por lo que necesitamos entender la instrucción no solamente del punto de vista del aprendizaje convencional sino como un proceso de comunicación.

3. ANÁLISIS DE TUTORES

En esta sección se mencionan aquellos sistemas tutores inteligentes que se han planteado modelos efectivos que han sido funcionales para un aprendizaje continuo y funcional.

3.1 GUIDON

Desarrollado por William Clancey en el año 1979. Siendo el primero en conocimientos médicos basado en sistema experto llamado MYCIN.
MYCIN, diagnosticaba enfermedades internas basándose en el historial de pruebas clínicas del paciente (Shortliffe et al., 1979). GUIDON enseñó a los estudiantes de medicina a identificar el organismo más probable en la meningitis y la bacteriemia mediante la presentación de casos médicos, incluidos los antecedentes del paciente, el examen físico y los resultados de laboratorio. El proyecto exploró ampliamente el desarrollo de tutores basados en el conocimiento para enseñar habilidades de resolución de problemas de clasificación. El tutor utilizó 200 reglas de tutorial y 500 reglas de dominio de MYCIN, e invocó un esquema de control de encadenamiento hacia atrás y de profundidad primero.

ISSN: 2992-8338

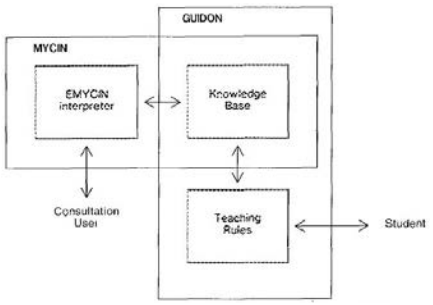


Figura 2. Arquitectura de GUIDON: Diagrama de consulta de la base de datos de MYCIN que es un STI (Woolf, B.,2010)

3.2 Andes

Es un desarrolló de un módulo de lenguaje natural llamado *Atlas* que puede agregarse a cualquier otro STI similar, para que el estudiante y el tutor puedan llevar un diálogo en lenguaje natural con el objeto de construir conocimiento. El papel de *Atlas* en el proceso de tutoría es muy pequeño, *Andes* lleva el control de la resolución de los problemas y cuando surge la oportunidad de promover el conocimiento profundo de la materia (hablar sobre la materia), *Atlas* toma el control para sostener un diálogo con el estudiante, una vez que *Atlas* concluye la línea de razonamiento deseada regresa el control a *Andes*.

1. **Tutor:** What does a *t* test tell you?
2. **Student:** It tests whether a mean is significant.
3. **Tutor:** Sorta.
4. **Tutor:** Can it be applied to experiments with just one group, or do you need two or more groups?
5. **Student:** More than one.
6. **Tutor:** Right. Because the *t* test compares the means of the two groups. What does it tell you about the two means?
7. **Student:** Whether they are significant.
8. **Tutor:** Almost. What you care about is whether one mean is really and truly higher than the other or whether the difference between them is just an accident of sampling. Does the *t* test tell you anything about that?
9. **Student:** Yes.
10. **Tutor:** So do you understand the *t* test now?
11. **Student:** Yes.
12. **Tutor:** Good. Let's go on.

Figura 3. Pantalla de Ejecución de Andes: Dialogo entre el sistema de Andes y la interacción con un estudiante, se visualiza preguntas y respuestas (Woolf, B.,2010)

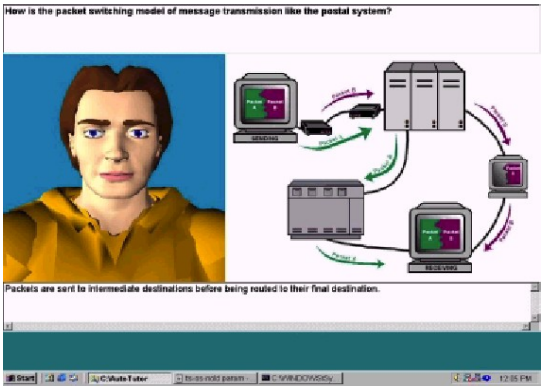
A este tipo de diálogos se les llama diálogos de construcción de conocimiento porque están diseñados para que los estudiantes infieran o construyan el conocimiento (Ejemplo usado con permiso de Taylor & Francis group).

3.3 AutoAutor

Es un STI desarrollado dentro de esta tendencia en tutores. *AutoTutor* es un Sistema Tutor Inteligente completamente animado para diferentes materias, entre ellas un curso de introducción a la computación para alumnos de nivel profesional. El sistema tiene un agente pedagógico animado que hace las veces de tutor. El objetivo del desarrollo de *AutoTutor* es el simular los patrones de diálogo de las conversaciones humanas.

El tutor esta representado por una cabeza parlante que se comunica con el estudiante mendiante acciones de apuntar y lenguaje natural hablado. En sus explicaciones, el tutor hace referencia a las figuras de las lecciones.

AutoTutor, es un sistema que lleva el control de la conversación, hace preguntas al estudiante en lenguaje natural sintetizado, que además aparece escrito en una ventana. El estudiante escribe en lenguaje natural las respuestas a las preguntas del tutor, ya que este Sistema Tutor Inteligente no tiene la capacidad de reconocimiento de lenguaje hablado. AutoTutor actúa como un compañero de diálogo para el estudiante y le entrega movimientos de diálogo con lenguaje sintetizado, entonación, expresiones faciales, movimientos de cabeza y acciones de apuntar, todo esto de manera coordinada. Los movimientos de diálogo que *AutoTutor* puede entregar a los estudiantes son cuatro: *pumps*, que tratan de que el estudiante exprese su conocimiento, por ejemplo, *¿Qué más?*; *hints*, que le dan pistas al estudiante, por ejemplo, *¿Qué necesitas para tomar fotografías?*; *prompts*, que intentan que estudiante termine una frase, por ejemplo, *Para tomar fotografías necesitas …*; y finalmente, *assertions*, que le dan la respuesta al estudiante, por ejemplo: *Para tomar fotografías necesitas una cámara*.



ISSN: 2992-8338

Figura 4. Pantalla de Ejecución de Autoautor: Pantalla que muestra la enseñanza del sistema experto a estudiante en base a una red de comunicación de las Tecnologías de la Información (Woolf, B.,2010)

3.4 AnimalWatch taught arithmetic

Es una aplicación de computador basado en la solución de problemas mediante aritmética relacionado con animales en peligro de extinción, diseñado para estudiante entre 10 a 12 años de edad, este tutor inteligente fue realizado por la Univesity of Massachusetts. AnimalWatch. Uno de sus objetivos de esta aplicación era ir aumentando la dificultad midiendo así la confianza de los estudiantes.

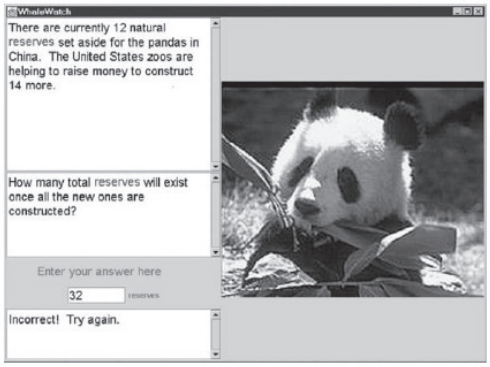


Figura 5. Pantalla de ejecución de AnimalWatch *taught arithmetic:* Pantalla que muestra la interacción entre un estudiante ante el desafió de resolver un problema matemático y el sistema apoya al estudiante resolverlo. (Woolf, B.,2010).

3.5 *Pum Taught Algebra (PAT)*

Pum Taught Algebra o PAT por sus iniciales ese un curso completo de para estudiantes de 12 a 15 años, desarrollado por el centro Pittsburgh Advanced Cognitive Tutor (PACT) de la universidad de Carnegie Melon. PAT es un modelo cognitivo, Control Adaptativo del pensamiento, conteniendo modelos psicológicos de los procesos cognitivos. Basado en herramientas modernas la cuales se contemplan: hojas de cálculo tables, gráficos y calculadoras, con el objetivo de expresar relaciones, resolver problemas. El objetivo principal de PAT era ayudar a estudiantes para resolver problemas y ver su relevancia (en un nivel de conocimiento) en las áreas académicas como en su lugar de trabajo. sobre cálculo, tablas, graficos y calculadoras, con el objetivo de expresar relaciones, para resolver problemas. El objetivo principal de PAT era ayudar a estudiantes para resolver problemas poco complejos o básicos y ver su relevancia en las áreas académicas y profesionales como en su lugar de trabajo.

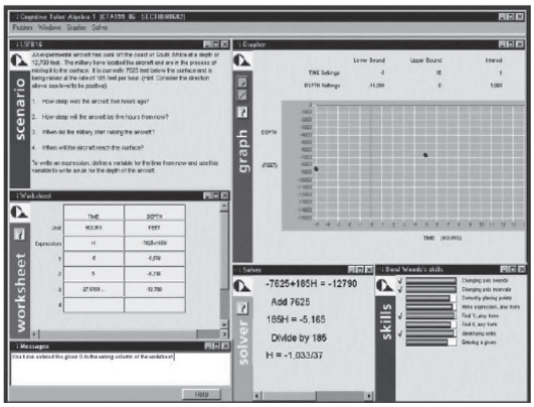


Figura 6. Pantalla de ejecución de PAT*:* Como se muestra PAT invitaba a los estudiantes a resolver problemas mostrando así su modernidad para la solución de estas como la interpretación. (Woolf, B., 2010).

3.6 *Agentes pedagógicos animados*

Los agentes pedagógicos animados ofrecen una gran promesa para ampliar el ancho de banda de la comunicación tutorial y aumentar la capacidad de los entornos de aprendizaje para involucrar y motivar a los estudiantes. Los agentes pedagógicos animados interactúan cara a cara con los estudiantes utilizando expresiones faciales, miradas, emociones y gestos deícticos, y cohabitan con los estudiantes los ambientes de aprendizaje.

3.7 Steve

Steve (Soar Training Expert for Virtual Environments) es un agente pedagógico que facilita el proceso de aprendizaje en el entrenamiento de dispositivos navales (operación de un submarino nuclear). Adele, desarrollada para ejecutarse sobre equipos de escritorio con interfaz convencional. Los cursos a los que da soporte actualmente están orientados a la formación médica continua.

ISSN: 2992-8338

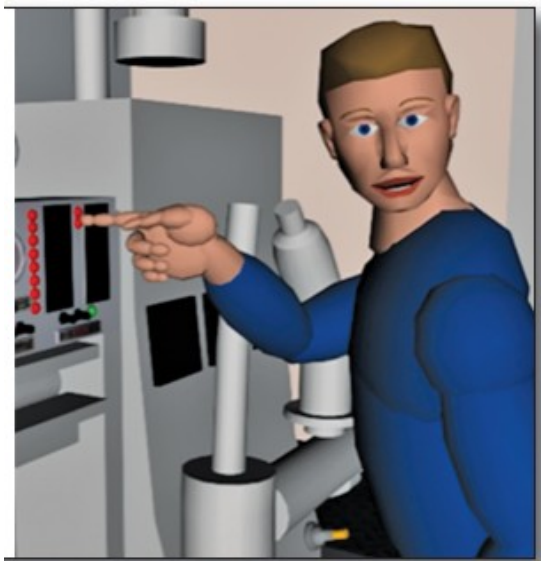


Figura 7. Diseño gráfico del modulo experto del Sistema Tutor Inteligente de Steve. (Woolf, B.,2010).

3.8 Herman the bug

Herman the bug, que habita un entorno de aprendizaje para niños que trata de la anatomía botánica y la fisiología. “Design-A-Plant” simula condiciones ambientales para que los niños puedan cuidar plantas y verlas crecer en esas condiciones. Herman es un insecto hablador que da consejos para la resolución de problemas a los estudiantes mientras observa sus acciones. Para explicar conceptos, Herman camina, se recoge, se expande, nada, salta, hace acrobacias entre otras cosas.s.

Figura 8. Ejecución del diseño gráfico en la interacción del Sistema Tutor Inteligente de Herman the bug (Woolf, B.,2010).

3.9 Cosmo

Es un agente que enseña a los estudiantes acerca de las topologías de red y los mecanismos de ruteo; explica cómo están conectadas las computadoras, cómo se ejecuta el ruteo, etc. WhizLow habita el entorno “CPU city 3D” que representa una tarjeta madre con tres componentes principales: RAM, CPU y disco duro, una unidad de control simple y una UAL, *más algoritmos de sistema como el ciclo fetch, paginación y memoria virtual y lo básico de compilación y ensamblaje.*

Figura 9. Pantalla de arranque del sistema tutor de Cosmo, toda una celebridad de los estudiantes informáticos. (Woolf, B.,2010).

3. DISCUSIÓN

Como parte de la investigación los Sistemas Tutores Inteligentes en la siguiente tabla se realiza su análisis basada en técnicas de modelos expertos y el tipo de aprendizaje identificado, cabe mencionar que un sistema tutor ayuda, aporta un conocimiento a todas las áreas del conocimiento si bien es implementado, aunque bien se sabe que esto lleva muchos años en investigación y se ha tratado de mejorar estos, es complicado, ya que se necesita demasiada información del experto para poder realizar un aprendizaje sin menos rango de error, sin embargo, se demuestra que algunos si son aplicables y funcionales para técnicas de aprendizaje.

Table 1. Comparación de Sistemas Tutores Inteligentes y sus enfoques

Técnicas	Sistemas Tutores Inteligentes
Técnicas de aprendizaje a la medicina	- *Steve* - GUIDON
Técnicas de Aprendizaje a las matemáticas	- AnimalWatch taught arithmeti - Pum Taught Algebra
Técnicas de	- *Cosmo*

ISSN: 2992-8338

aprendizaje a las Tics	- *AutoTutor*
Técnicas de aprendizaje adaptativo a cualquier tema	- Andes - Agentes pedagógicos adaptativos

El aprendizaje radica en un ser humano llega a ser consciente sobre lo que se encuentra el entorno, como bien se muestra los Sistemas Tutores Inteligentes ya mencionados son aquellos basados en un sector educativo, sin embargo, la evolución del STI también puede ampliarse al comportamiento del estudiante mediante su interacción analizando el tiempo de contestación, gestos del cuerpo o sonido de voz.

.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación, buscamos realizar una revisión sobre los módulos, técnicas de aprendizaje y herramientas aplicadas de la inteligencia Artificial que conforman a un Sistema Tutor Inteligente, teniendo que, dentro del módulo del experto; en el módulo del estudiante el modelo predictivo basado en sistema de conocimiento experto ha sido el más utilizado debido a su efectividad, ya que se conoce las respuestas de acuerdo a su efectividad y posible respuestas, manteniendo un base de conocimiento concisa y puntual; en cuanto al módulo tutor, es importante hacer un conocimiento de prueba basado en todos los posibles casos, esto incrementara una detección con un rango de error menor ; en el módulo interfaz, con el uso de los agentes pedagógicos se busca motivar al usuario para que tenga una buena interacción con el STI en cuestión, en este módulo no se puede hacer una comparación entre dichos agentes, ya que cada uno de ellos como ya se menciono tiene el mismo objetivo, cabe mencionar que en algunos casos puede llegar a representar distracción.

REFERENCIAS

La siguiente lista de referencias esta constituida por artículos científicos, libros y revistas, las cuales aportan a esta investigación. Es importante precisar que la mayor información fue basada en Woolf, B. (2010). *Building Intelligent Interactive Tutors Student-centered strategies for revolutionizing e-learning, para un comienzo básico del Sistemas Tutores Inteligentes.*

Beck, J., Stern, M., & Haugsiaa, E. (1996). *Applications of AI in Education*, https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/332148.332153

Pantoja Francisco , Brunny. Aplicaciones de Agentes Pedagógicos en Entornos Virtuales Pedagógicos en Entornos Virtuales para la Enseñanza. V Congreso Internacional de Educación, https://core.ac.uk/download/pdf/15781603.pdf.

Johnson, W., Rickel, J., & Lester, J. (2000). Animated Pedagogical Agents: Face-to-Face Interaction in Interactive Learning Environments. *International Journal of Artificial Intelligence in Education.*

Shaw, E., & Johnson, L. (1997). Educación Avanzada a Distancia (ADE), https://www.isi.edu/isd/ADE/ade-body.html

Urretavizcaya, M. (2001). Sistemas inteligentes en el ámbito de la educación. Inteligencia Artificial. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 5-12.

VanLehn, K. (1988). *Foundations of Intelligent Tutoring Systems.* New York: Martha C. Polson, J. Jeffrey Richardson.

Woolf, B. (2010). *Building Intelligent Interactive Tutors Student-centered strategies for revolutionizing e-learning.* Morgan Kaufmann.

PLAN SONORA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Increase in the Dielectric Permittivity of Cobalt Oxide in Nanoparticulate Thin Films

Martín Ernesto Andrade Sánchez *, Georgina García Pacheco, María de los Ángeles Hernández Pérez*****

**TECNM-tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec*
México (Tel: 5571837459; e-mail: mandrades@tese.edu.mx).
***IPN-Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica UPT*
(e-mail:ggpacheco@outlook.com)
**** IPN- Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas*
(e-mail: angeleshp@yahoo.com)

Abstract The study of the dielectric properties of nanoparticulate Co_3O_4 synthesized by the sol-gel and dip coating method are study in this work. The synthesis was carried out with the mixture of cobalt acetate tetrahydrate and methanol, adding citric acid in different concentrations to study the effect of the pH of the solution on the particle size of the products and on the quality of the films manufactured. It was decided to obtain pure Co_3O_4 using the SAED electron diffraction technique in a transmission electron microscope, while the crystallographic planes and particle sizes were confirmed in images with a scale of up to 5 nm. Subsequently, the band gap of the films will be determined through the Tauc analysis method with UV-Vis measurements. Finally, thicknesses were measured with a profilometer, and parallel plate capacitors were manufactured to measure the dielectric constant and determine the permittivity value in the different films with different particle sizes. This is how it is determined that the smallest particle size is obtained when the pH value is reduced to 4 and the highest bandgap value is also obtained under the same synthesis. Likewise, the dielectric constant will be considered to increase more than double with particle sizes up to 5 nm.

Keywords: Cobalt oxide, dielectric permittivity, particle size, sol-gel, dip coating

1. INTRODUCCIÓN

La transformación de energía, su almacenamiento y ahorro son de interés mundial debido al inminente agotamiento de los recursos fósiles y a la consecuente contribución al calentamiento global. No obstante, la generación de electricidad verde proveniente de las fuentes de energía renovables aún no es suficiente para poder abastecer la energía derivada del petróleo. Adicionalmente, las características de intermitencia, variabilidad e impredecibilidad impiden su uso de manera directa (Y. Uygun, 2021). Entonces, el desarrollo e investigación en dispositivos de almacenamiento de energía es relevante para la regulación y el control de la energía en los procesos industriales. Por otro lado, a nivel de usuario, en tema de almacenamiento de energía, debe de garantizar la portabilidad, carga rápida y una mayor densidad de energía de los dispositivos almacenadores.

A partir de lo anterior, se destaca que la generación de energía verde es uno de los problemas globales que enfrenta la humanidad y se encuentra descrito en el objetivo 7 “Energía asequible y no contaminante” de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que forman parte de la agenda 2030, establecida en 2015 por la Convención del Cambio Climático, celebrada en París, Francia (J. Ding, 2010). La nanotecnología en 2 décadas ha demostrado ser una herramienta útil para afrontar dichas problemáticas globales, a partir de su aplicación en las principales industrias promotoras de la economía como la industria alimentaria, farmacéutica, textil, electrónica y de transporte (S. Koohi-Fayegh, 2019). Así, la I&D de nanomateriales no solo es necesario sino apremiante.

En esta investigación se explora el cambio en el comportamiento de propiedades eléctricas de la Co_3O_4 en función del tamaño de partícula. La motivación está enfocada a que la manipulación del tamaño de partícula puede incrementar la constante de permitividad para su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía por medio del mecanismo de polarización.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMIENTAL

La síntesis realizada en este trabajo se propuso a partir de un trabajo anterior (M. Aneke, 2020), donde se realizaron películas delgadas con una síntesis con una concentración de 24 mL de CH_3OH y 3gr de acetato de cobalto tetrahidratado, modificando el pH con ácido cítrico a 7 y 5. El resultado de esta síntesis fueron películas de partículas con buena distribución de partículas, pero con algunos defectos, como se muestra en la Figura 1.

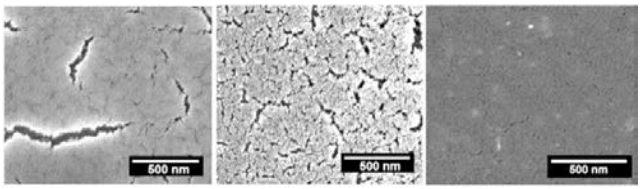


Figura 1. Imágenes SEM de los espesores de las películas de Co3O4 hechas con 3gr de acetato de cobalto y 24 ml de metanol.

ISSN: 2992-8338

Por lo anterior, la síntesis de las películas de Co_3O_4 reportadas en este trabajo se llevó a cabo por un proceso de sol-gel asistido por depósito por inmersión, en el cual se mezcla acetato de cobalto tetrahidratado ($Co(CH_3COO)_2{\cdot}4H_2O$, 99:M;%, Aldrich) y metanol (CH_3OH , 99.97%, Aldrich) como reactivos. Se estudió la influencia del pH en la formación de las partículas, su tamaño alcanzado y la calidad de la película, para lo cual se agregó $C_8H_6O_7$. En la tabla 1 se muestran la matriz de experimentos realizada en la síntesis. Bajo estas condiciones se llevó a cabo la formación del sol al mezclar los precursores y agitación durante 1 hora a una temperatura de 60°C. Las películas procedentes de cada muestra fueron fabricadas mediante 4 inmersiones a una velocidad de retiro de 1cm/min. El secado entre cada inmersión se llevó a cabo a 60°C por 5 min.

Tabla 1. Matriz experimental de la síntesis de películas óxido de cobalto.

Muestra	Temp.	pH	$Co(CH_3COO)_24H_2O$	CH_3OH	$C_6H_8O_7$	Película Co_3O_4
Te7D	60 °C	7	1 g	50 mL	-	PTe7D
Te6D	60 °C	6	1 g	50 mL	143 mg	PTe6D
Te5D	60 °C	5	1 g	50 mL	310 mg	PTe5D
Te4D	60 °C	4	1 g	50 mL	538 mg	PTe4D

A partir del trabajo anterior, se determinó la formación de Co_3O_4 pura por DRX, por lo que se realizó TEM empleando un microscopio JEOL (JSM-6701F) para observar el tamaño de las partículas y comprobar la formación de la fase fd3m del Co_3O_4. Se observo la calidad de las películas usando MEB empleando un microscopio JEOL (JSM-6701F) a 30 000X y 100000X. El espesor de las películas se determinó con un perfilómetro marca Vecco Dektak 150.

Posteriormente, las películas fueron caracterizadas eléctricamente, para lo cual se realizó un análisis UV-Vis para determinar el band gap de cada una de las películas utilizando el método de TAUC. Finalmente, las películas fueron depositadas en sustratos de ITO, en los que se realizó el depósito de aluminio con el uso de máscaras de sombra por el método de sputtering, este proceso se llevó a cabo con un vacío de cámara de $1x10^{-5}$ mbar usando gas de argón, con una potencia de 2000W en corriente directa. Así se conformaron los capacitores de placas paralelas que fueron caracterizados en utilizando el equipo keythley 4200, se midió la tendencia capacitancia-Frecuencia (CF) y Capacitancia-Voltaje (CV) utilizando corriente alterna. A partir de estos gráficos se determinó la contante dieléctrica de la física del capacitor.

3. RESULTADOS

Resultados MEB de las películas de Co_3O_4

En la Figura 2 se muestran las imágenes SEM de estas películas a 30000X y 100000X para identificar la homogeneidad, morfología y tamaño de partícula.

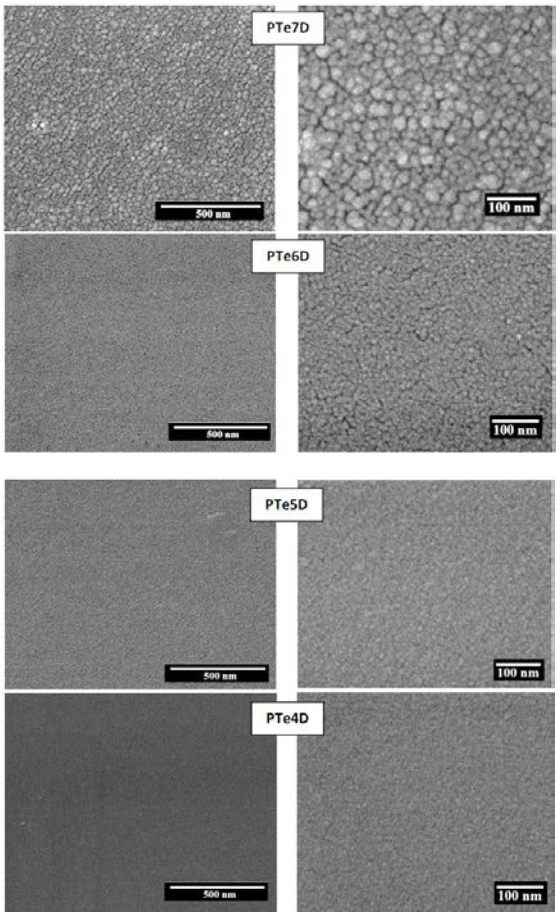


Figura 2. Imágenes SEM de los espesores de las películas PTe7D, PTe6D, PTe5D y PTe4D con tratamiento térmico.

En todas las películas se presentó alta homogeneidad superficial, por lo que el uso de mayor volumen de metanol promovió la eliminación de los defectos y grietas observadas en las películas preparadas con menor volumen de metanol (PTa7, PTe7 y PTe5). La disminución de la concentración de partículas del sol formado permitió un depósito más controlado y uniforme, aunque se requirió un mayor número de inmersiones. Por otro lado, la modificación del pH tuvo el efecto esperado en el tamaño de partícula, a un pH neutral (PTe7D) se observan partículas semiesféricas bien definidas, que van reduciendo en tamaño conforme disminuye el pH. El tamaño de partícula de la película PTe7D varía entre 25 y 10 nm, mientras que las películas PTe6D y PTe5D presentan una distribución de tamaños más angosta y tamaño promedio de 10 nm. El tamaño de partícula en la película depositada a pH 4 es aparentemente más pequeño pero su estimación a partir de la imagen no es precisa.

ISSN: 2992-8338

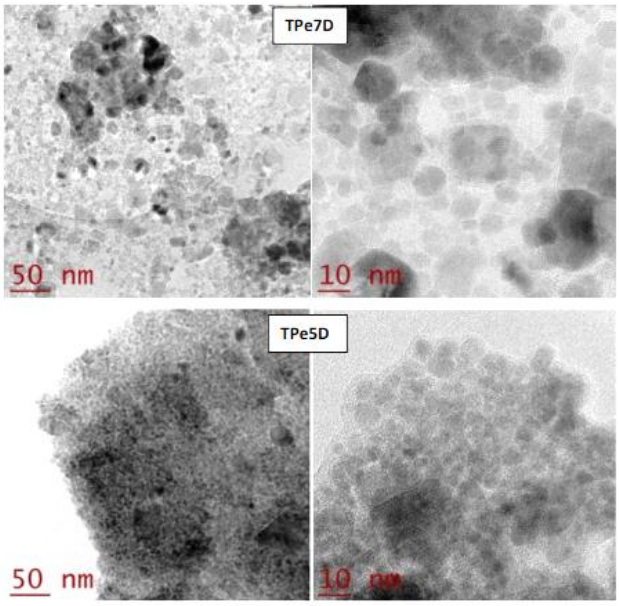


Figura 3. Imágenes TEM de las películas PTe7D y PTe5D.

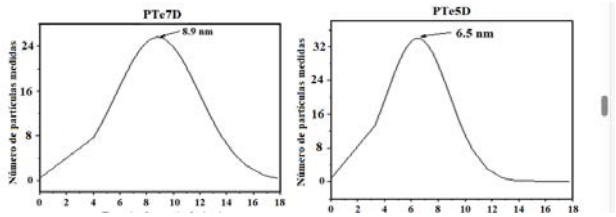


Figura 4. Imágenes TEM de las películas PTe7D y PTe5D.

A partir de las imágenes de TEM de alta resolución de las películas PTe7D y PTe5D, mostradas en la Figura 5 y 6, se determinaron las distancias interplanares de las partículas. En ambas películas se encontraron únicamente distancias interplanares correspondientes a la estructura del Co_3O_4. En la Tabla 2 se muestran los planos identificados en las imágenes de TEM en base a las distancias interplanares reportadas en las cartas cristalográficas.

Tabla 2. Comparación de las distancias interplanares de las películas PTe7D y PTe5D

No	Plano	d- Teórico (Å)	PTeD, d (Å)	PTe5D, d (Å)
1	(1 1 1)	4.667	4.650	4.712
2	(2 2 0)	2.858	2.845	2.962
3	(3 1 1)	2.437	2.448	2.513
4	(2 2 2)	2.334	2.409	----
5	(4 0 0)	2.021	2.027	2.063

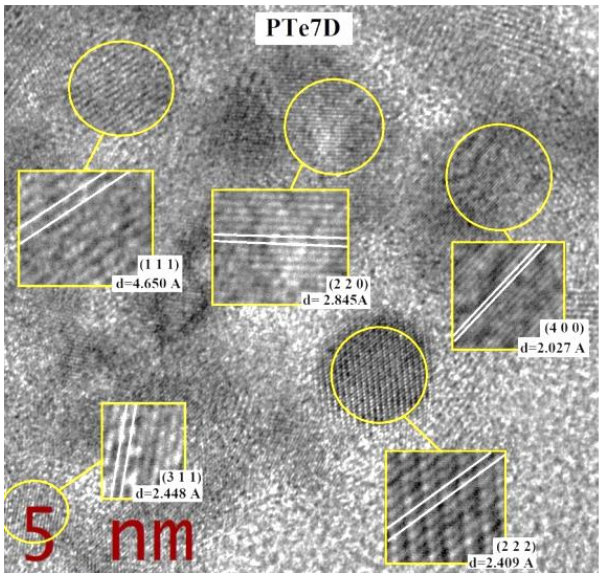


Figura 5. Imágenes TEM de las películas PTe7D y PTe5D.

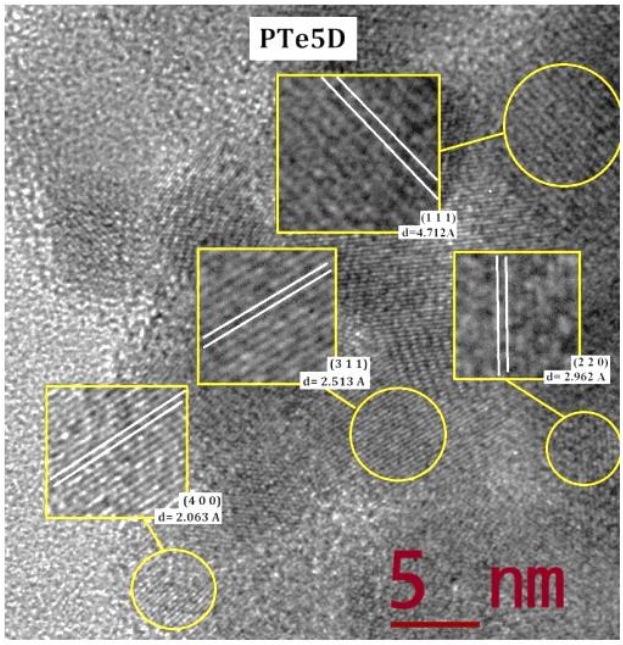


Figura 6. Determinación de las distancias interplanares de la película PTe5D.

Además, se obtuvieron patrones de difracción de electrones de las películas analizadas, a partir de los mismos se corroboró la presencia de la fase cristalina de la fase Co_3O_4, en la Figura 8 se presentan las imágenes. La estructura cristalina determinada para las dos películas fue la de Co_3O_4, el único plano que no se observa en el patrón es el (2 2 2), ya que es de baja intensidad y muy cercano al plano principal (3 1 1). Por otro lado, en ambos casos los valores de d varían en un rango máximo de 0.09 A˚, lo cual indica que la estructura cristalina de las nanopartículas en la película corresponde a la estructura convencional (volumen). Figura 7. Patrones de anillos de

ISSN: 2992-8338

difracción de electrones (SAED) para las películas PTe7D y PTe5D.

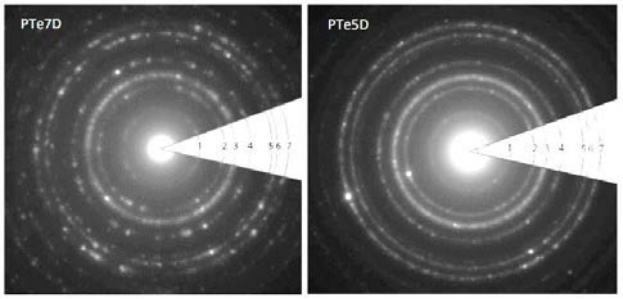


Figura 7. Patrones de anillos de difracción de electrones (SAED) para las películas PTe7D y PTe5D.

Espesor de las películas

En la Figura 8 se presentan los resultados obtenidos. El espesor promedio de la película PTe7D fue de 50 nm, mientras que el de la película PTe6D se determinó en 100 nm. Asimismo, en las películas PTe5D y PTe4D el espesor promedio fue de 40 nm y 30 nm, respectivamente. Como se esperaba, el espesor de estas películas, preparadas con 15 inmersiones, es menor al obtenido cuando se emplearon soles más concentrados (4 inmersiones).

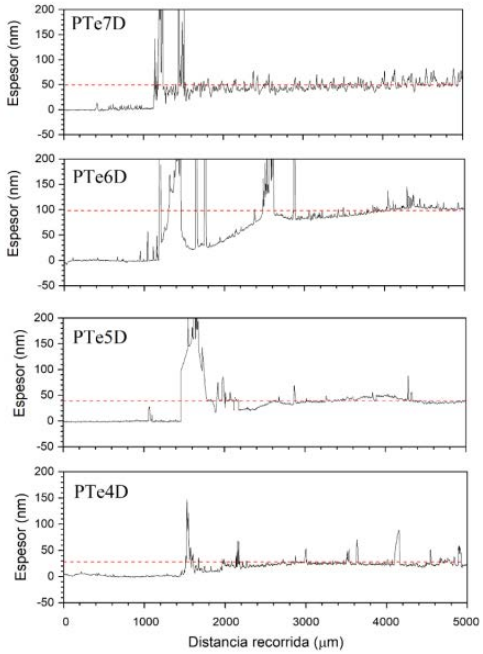


Figura 8. Perfil de las películas PTe7D, PTe6D, PTe5D y PTe4D.

De acuerdo con el perfil de todas las películas se puede decir que son homogéneas, esto concuerda con la homogeneidad observada a partir de las imágenes obtenidas por SEM. Sin embargo, en PTe7D y PTe4D se identifica una textura más rugosa, que no se considera significativa. Las crestas al inicio del recorrido de la punta se deben al material que se acumula entre la película misma y la cinta adherida al sustrato para formar el escalón.

Cálculo del band gap del Co_3O_4 en las películas PTe7D, PTe6D, PTe5D y PTe4D

Las propiedades ópticas de las películas de Co_3O_4 se estudiaron a partir de los espectros de absorción UV-Vis. El valor de la banda prohibida o band gap (Eg) se determinó con la relación de Tauc. En cada una de las gráficas se identificaron dos transiciones ópticas. La primera es de baja absorbancia, se ubicada en la región de baja energía (~ 750 nm) y corresponde al proceso de transferencia de carga $O^{2-} \rightarrow Co^{3+}$ (V. R. Shinde, 2006) que se asigna a un semiconductor de banda de energía indirecta (F. Liu, 2017). La transición principal, es de alta intensidad, se ubicada a mayor energía (~ 500 nm) y corresponde al proceso de transferencia $O^{2-} \rightarrow Co^{2+}$ asignado a un semiconductor de banda prohibida directa (F. Švegl, 2000). El valor de Eg de las películas estudiadas varía entre 1.16 y 1.94 eV para la transición secundaria y entre 2.06 y 2.27 eV para la transición principal. El valor de Eg aumenta con la disminución del pH del sol empleado para el depósito de cada película, este corrimiento a mayor energía está directamente relacionado con la disminución de tamaño de partícula. Además, el Eg de las películas es de mayor energía que el del material masivo, 1.6 eV (C. Suryanarayana,1995), a mayor diferencia se pueden presentar efectos cuánticos en las partículas como resultado del pequeño tamaño de las partículas.

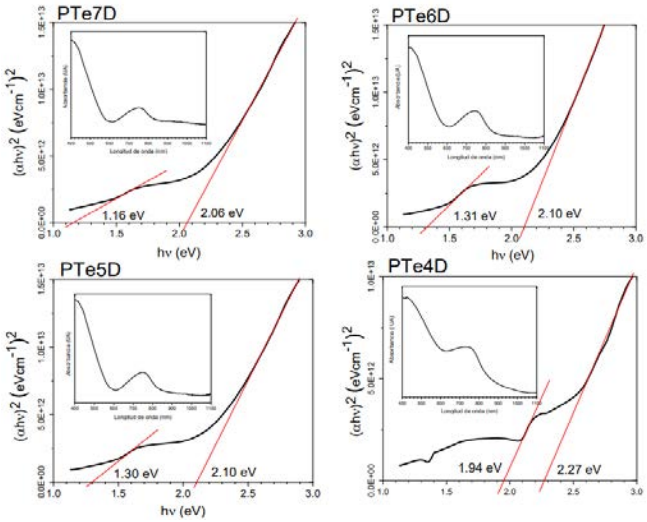


Figura 9. Gráficos de Tauc de las películas PTe7D, PTe6D, PTe5D y PTe4D, los insertos corresponden a los espectros de absorción.

La determinación de la constante dieléctrica del Co_3O_4 De acuerdo con lo observado en la gráfica anterior, se determinó que los capacitores fabricados de Co_3O_4 nanoparticulado solo funcionan a bajas frecuencias, en un rango muy pequeño de 2 a 3 kHz. Diversos estudios indican que el Co_3O_4 puede presentar altos valores de permitividad a VLF (muy baja frecuencia) en rangos de 1 a 10 Hz (T. Ozkaya, 2009), lo cual puede indicar que el mecanismo de polarización o, en su defecto, la respuesta dieléctrica es gradual para el Co_3O_4. Sin embargo, en el equipo Keithley utilizado para las mediciones no alcanza rangos de frecuencia tan bajos. Por lo que, Se muestran solo los resultados obtenidos a una frecuencia de

ISSN: 2992-8338

2kHz, el cuál fue el valor en el cual se observaba el máximo valor de capacitancia en la curva C-F obtenida.

En la Tabla 3 se resumen las mediciones de los micro-capacitores, de forma que se puede determinar una tendencia de los valores de la constante dieléctrica y relacionarlos con las características microestructurales del Co_3O_4 para cada muestra.

Table 3. Valores de la medición de los capacitores

Muestra	Área m^2	Espesor nm	Capacitancia F	Constante Dieléctrica
PTe7	$1.770x10^{-7}$	50	$1.015x10^{-9}$	35.22
PTe7	$1.850x10^{-7}$	50	$0.921x10^{-9}$	43.90
PTe7	$2.136x10^{-7}$	50	$1.260x10^{-9}$	33.32
PTe6	$1.790x10^{-7}$	100	$0.843x10^{-9}$	53.10
PTe6	$2.503x10^{-7}$	100	$1.090x10^{-9}$	49.02
PTe6	$2.290x10^{-7}$	100	$1.080x10^{-9}$	53.28
PTe5	$1.123x10^{-7}$	40	$1.310x10^{-9}$	52.80
PTe5	$2.480x10^{-7}$	40	$2.190x10^{-9}$	59.35
PTe5	$1.170x10^{-7}$	40	$1.466x10^{-9}$	56.22
PTe4	$0.441x10^{-7}$	30	$0.986x10^{-9}$	75.68
PTe4	$0.709x10^{-7}$	30	$1.484x10^{-9}$	70.90
PTe4	$0.899x10^{-7}$	30	$1.700x10^{-9}$	60.09

Inicialmente para cada muestra se observa una tendencia en los valores de constante dieléctrica, para PTe7D un valor promedio de 37.48; para la muestra PTe6D un valor de 51.8, mientras que para PTe5D se obtuvo un promedio de 56.12. Finalmente, para PTe4D la constante dieléctrica promedio fue de 68.89. Los resultados anteriores indican que hay una tendencia de aumento de la constante dieléctrica como consecuencia de la disminución del tamaño de partícula, mientras que se observa un aumento de la banda prohibida.

CONCLUSIONES

La dilución de los soles con pH de 7, 6, 5 y 4, produjo películas homogéneas con tamaños de partícula entre 10 y 6 nm. Esto resulto en un band gap de 2.06, 2.10, 2.10 y 2.27 eV, y de la constante dieléctrica de 37, 51, 56, 68 para las muestras con pH de 7, 6, 5 y 4, respectivamente. Estos resultados indican un cambio en el comportamiento dieléctrico del material, como consecuencia de la disminución del tamaño de partícula. Ya que, el aumento de límites de grano produce pérdida de continuidad cristalina y zonas de alta energía, aunado con el aumento de dominios, cuyo comportamiento dipolar se incrementa, reflejándose en la magnitud de la constante dieléctrica. Además, el band gap de cada muestra aumento, en la transferencia principal del O2-⟶Co2+, debido a la cantidad de los átomos presentes en la región intercristalina, contribuyendo al cambio de la propiedad dieléctrica.

.

REFERENCIAS

Y. Uygun. (2021). The Fourth Industrial Revolution - Industry 4.0”, SSRN Electron. J., núm. 1, pp. 74–78.

J. Ding y A. Somani. (2010). A long-term investment planning model for mixed energy infrastructure integrated with renewable energy, 2010 IEEE Green Technol.

S. Koohi-Fayegh y M. A. Rosen. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. J. Energy Storage, vol. 27, (p. 101047).

M. Aneke y M. Wang. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. Appl. Energy, vol. 179. (pp. 350–377).

V. R. Shinde, S. B. Mahadik, T. P. Gujar, y C. D. Lokhande. (2006). Supercapacitive cobalt oxide (Co_3O_4) thin films by spray pyrolysis. Appl. Surf. Sci., vol. 252, núm. 20, (pp. 7487–7492).

F. Liu, H. Su, L. Jin, H. Zhang, X. Chu, y W. Yang, (2017) Facile synthesis of ultrafine cobalt oxide nanoparticles for highperformance supercapacitors. J. Colloid Interface Sci., vol. 505, (pp. 796–804).

F. Švegl, B. Orel, I. Grabec-Švegl, y V. Kaučič. (2000) Characterization of spinel Co_3O_4 and Li-doped Co_3O_4 thin film electrocatalysts prepared by the sol-gel route. Electrochim. Acta, vol. 45, núm. 25–26, (pp. 4359–4371).

C. Suryanarayana (1995). Nanocrystalline materials. Int. Mater. Rev., vol. 40, núm. 2, (pp. 41–64).

T. Ozkaya, A. Baykal, M. S. Toprak, Y. Koseoğlu, y Z. Durmuş. (2009), Reflux synthesis of Co_3O_4 nanoparticles and its magnetic characterization. J. Magn. Magn. Mater., vol. 321, núm. 14, (pp. 2145–2149).

ISSN: 2992-8338

Logic inverters fabrication based on thin-film transistors.

Norberto Hernandez-Como*, Cuauhtemoc Leon-Puertos*, Isai Hernandez-Luna*, Arturo Torres-Sanchez*

**Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, Instituto Politécnico Nacional, Mexico,*
nohernandezc@ipn.mx

Abstract: This paper presents the manufacturing process of thin-film transistors (TFTs) based on Indium-Gallium-Zinc-Oxide (IGZO) that is available at the "Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional". The TFT manufacturing process produces channel lengths of up to 5 micrometers and a low processing temperature of less than 200 °C. With this technology, the manufacture of logic inverters is demonstrated and their response in DC and AC is shown. This technology is the base for the development of more complex circuits for low-frequency applications such as circuits for Near Field Communication (NFC), Radio-frequency identification (RFID), Internet-of-Things (IoT), and wearable or Smart-textile devices.

Keywords: IGZO, TFTs, Electrónica flexible, Inversores.

1. INTRODUCTION

Los transistores de película delgada (TFTs, por sus siglas en inglés) a base de Indio-Galio-Óxido de Zinc (IGZO) fueron reportador por primera vez en el 2003 por (Nomura et al., 2003). Los TFTs de IGZO vienen a sustituir la tecnología de silicio amorfo, esto debido a una movilidad mayor a los 10 cm^2/V-s. En la actualidad, compañías dedicadas a la comercialización de pantallas como son: Sharp, Samsung Electronics y LG Electronics, utilizan TFTs de IGZO para sus productos de pantallas de cristal líquido (LCDs), pantallas de diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs) y pantallas de papel electrónico (Zhu et al., 2021). Hoy día se busca expandir las aplicaciones de tecnologías como la de TFTs de IGZO más allá de las pantallas, para lo cual se ha comenzado a evaluar su potencial en circuitos electrónicos más elaborados (Yu et al., 2015). Se busca que este tipo de tecnología ingrese donde las capacidades de los circuitos integrados de silicio no se aprovechan al máximo, esto incluye aplicaciones a baja frecuencia como circuitos para Near Field Communication (NFC), Radio-frequency identification (RFID), Internet-of-Things (IoT) y dispositivos wearables o Smart-textiles. En los últimos años, podemos encontrar reportes de fabricación de microprocesadores de 8 y 32 bits hechos con procesos comerciales disponibles a través de la empresa Pragmatic (Biggs et al., 2021; Celiker et al., 2022).

Por la relevancia de la tecnología de TFTs de IGZO y su futuro prometedor, en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional se ha desarrollado un proceso de fabricación con potencial para comenzar a realizar los primeros circuitos integrados de este tipo en México. A diferencia de tecnología muy avanzadas, como el silicio, donde México tiene un rezago tecnológico de casi 40 años, la tecnología de TFTs solo presenta un rezago tecnológico de aproximadamente 10 años. Por lo tanto, son tecnologías que pueden aprovecharse para emparejarse más rápidamente con los avances internacionales. Además, este tipo de desarrollo tecnológico permitirá estar mejor posicionados ante las nuevas tecnologías, como por ejemplo de transistores a base de materiales 2D y ferroeléctricos.

En este trabajo, se presenta una propuesta tecnológica para TFTs de IGZO totalmente fabricados en México y se demuestra su potencial aplicación en circuitos demostrando la fabricación de inversores lógicos. Los resultados marcan el comienzo del desarrollo de esta tecnología que se espera en un corto plazo sirva para mejorar la educación en estos temas y también desarrollar soluciones tecnológicas que el país requiera.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño

Primeramente, se realizó un diseño por computadora de los TFTs y de los inversores lógicos con el software L-Edit. El diseño consiste en 5 niveles de fabricación o máscaras de fotolitografía. Cabe mencionar que, por ser una tecnología propia, solo se sigue una sola regla de diseño y que consiste en mantener una separación mínima entre estructuras de por lo menos 5 micrómetros (um). Un conjunto de reglas de diseño adicionales se encuentra en desarrollo. En la Figura 1 se muestra el diseño de un TFT y como esta regla general de diseño, de separación de 5um, se implementa para la compuerta, el semiconductor y los electrodos de fuente/drenador. En las misma figura se muestra un corte transversal, realizado desde el software de diseño, para mostrar cómo se ensamblan los materiales a través de los diferentes pasos de fabricación. La estructura diseñada se conoce como de compuerta por abajo y fuente/drenador por arriba, y que en inglés se conoce como la estructura "*staggered bottom-gate*".

El diseño presentado en este trabajo se escoge porque nos brinda la mayor compatibilidad tecnológica con la infraestructura del laboratorio. Por ejemplo, la compuerta de oro soporta los ataques químicos para remover el dieléctrico. Por otro lado se utiliza el método de definición de patrones por

ISSN: 2992-8338

lift-off para evitar dañar por ejemplo el semiconductor al definir fuente/drenador. Lift-off es un método donde no se utilizan ataques químicos para definir las geométrias de los materiales.

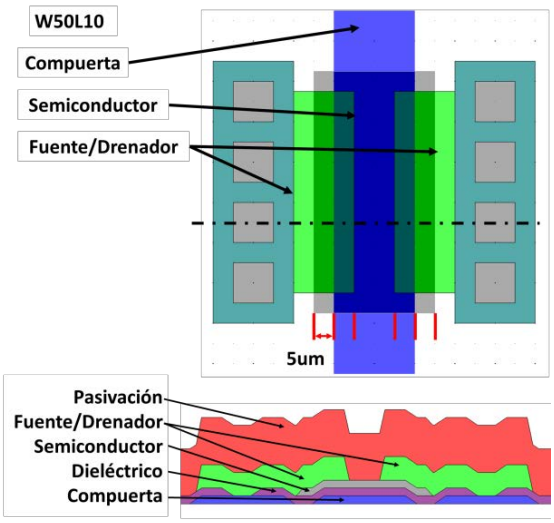


Figura 1 Diseño de un TFT mostrando las separaciones de 5um, y un corte transversal del TFT.

2.2 Proceso de fabricación de TFTs

Hasta ahora nuestro proceso de fabricación de TFTs es compatible con tres tipos de sustratos aislantes: obleas de silicio recubiertas con 500 nm de óxido de silicio, sustratos de vidrio, y sustratos flexible de poliimida. En este trabajo se reporta la utilización de sustratos de poliimida y la respuesta de transistores con estructura de contacto inferior de compuerta y contactos superiores de drenador y fuente. Todos los procesos de fotolitografía se realizan utilizando resina positiva S1813, revelador MF-319 y el equipo de transferencia de patrones Heidelberg DWL66FS. Primero se realiza un depósito por evaporación de haz de electrones de Cr/Au y el primer nivel de fotolitografía consiste en definir la geometría de la compuerta, lo cual se realiza atacando químicamente ambas películas. Los atacantes comerciales para estos dos metales pueden encontrarse con los proveedores de reactivos químicos. Posteriormente, se realiza el depósito de óxido de aluminio (Al_2O_3), por la técnica de depósito por capas atómicas (ALD, por sus siglas en inglés) a 150 ºC. Se utilizan como precursores al vapor de agua y el Trimetilaluminio. Después, se procede a realizar el segundo paso de fotolitografía para atacar químicamente el Al_2O_3 con ácido fluorhídrico y tener acceso al contacto de compuerta (G) de Cr/Au. Posteriormente se realiza el depósito de IGZO, por la técnica de RF Sputtering a temperatura ambiente y con una potencia de 70 W. La película de IGZO se define con un tercer paso de fotolitografía por el método de lift-off. Después es necesario un recocido en atmosfera de aire a 150 ºC durante 1hr para equilibrar las vacancias de oxígeno en el IGZO. El cuarto paso de fotolitografía se realiza igualmente por medio de lift-off para definir los contactos de fuente (S) y drenador (D) con 200 nm de molibdeno por DC Sputtering. Finalmente, se realiza el depósito por spin-coating de 400 nm de resina positiva PMMA A6 como capa pasivante y el quinto paso de fotolitografía se utiliza para abrir acceso a los contactos de compuerta, fuente, drenador. El ataque de PMMA se realiza con un plasma de oxígeno, es decir, con ataque seco. Para la fabricación de inversores, se utilizan las capas metálicas de compuerta (G), fuente (S) y drenador (D) para realizar las interconexiones necesarias. La secuencia tecnológica para la fabricación de los TFTs y datos eléctricos y espesores de los materiales se describen en la Figura 2.

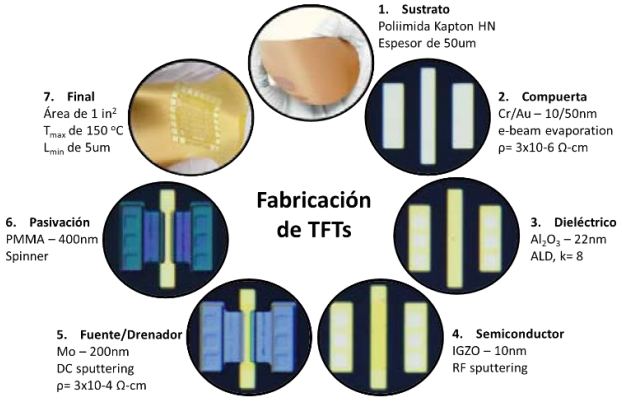


Figura 2 Proceso de fabricación de TFTs.

2.3 Pruebas eléctricas

Una vez terminada la fabricación se procedió a realizar las mediciones corriente-voltaje con el equipo Keithley 4200-SCS y una estación de puntas. Los transistores son polarizados para obtener sus curvas transferenciales y curvas de salida. Es importante mencionar que los transistores de IGZO son de tipo enriquecimiento de canal-n. Por otro lado, los inversores son medidos en DC y AC. Para las mediciones en AC se utilizó un osciloscopio Tektronix MSO 3054, un generador de señales Tektronix AFG1022, y una fuente de voltaje Keithley 2213A-30-3. También se fabricaron capacitores y a estos se les caracteriza sus curvas corriente-voltaje y capacitancia-voltaje para obtener los valores de constante dieléctrica del Al_2O_3.

3. RESULTADOS

Los capacitores de Al_2O_3 tienen una estructura metal-aislante-metal. En nuestro proceso de fabricación esto resulta en capacitores de Cr/Au/Al_2O_3/Mo. Se fabrican con diferentes áreas de: 25x25, 50x25, 50x50, 100x50 y 200x100 micras cuadradas. Se obtuvo una capacitancia por unidad de área de 275 nF/cm^2, una constante dieléctrica de 8, un voltaje de ruptura de 15-20 V y una densidad de corriente de 10^{-9} A/cm^2. La capacitancia presenta un incremento lineal con el incremento del área tal como lo predice la ecuación de un capacitor de placas paralelas, $C= (\varepsilon_0 * k * A)/t_{ox}$. Donde ε_0 es la permitividad del vacío, k es la constante dieléctrica, A es el área del capacitor y t_{ox} es el espesor del Al_2O_3.

Los transistores fabricados fueron caracterizados eléctricamente para obtener su respuesta transferencial. Recordemos que el transistor tiene tres terminales, donde la fuente (S) se polariza a 0V o tierra, se aplica un voltaje fijo de

ISSN: 2992-8338

3V entre drenador y fuente (V_D) y un voltaje variable de 0 a 3V entre compuerta y fuente (V_G). Con la curva transferencial se extraen los parámetros principales de cada transistor utilizando la ecuación de corriente de drenador en saturación dada por (Hu et al., 2017):

$$I_D = \left(\frac{W\, C_p\, \mu_{sat}}{2L}\right)(V_G - V_{TH})^2 \quad (1)$$

Donde C_p es la capacitancia por unidad de área obtenida a partir de considerar una constante dieléctrica de 8 para el Al_2O_3 y que en nuestro caso tuvo un valor de 275 nF/cm^2. La movilidad de los portadores está dada por μ_{sat} y V_{TH} es el voltaje de umbral. Estos dos últimos parámetros se obtienen de la raíz cuadrada de la corriente de drenador. Otro parámetro importante es la pendiente subumbral (SS), que refleja la calidad de la interfaz dieléctrico/semiconductor del transistor, y está dada por:

$$SS = \left(\frac{d\log(I_D)}{dVg}\middle|max\right)^{-1} \quad (2)$$

Otro parámetro importante es la relación de corriente de drenador encedido/apagado denominada Ion/Ioff. Estos parámetros se calcularon para transistores con diferentes dimensiones W/L. Se encontró un V_{TH} de cerca de 1V, una movilidad de 5 cm^2/V-s, una Ion/Ioff de 10^6, y una SS de 200 mV/dec.

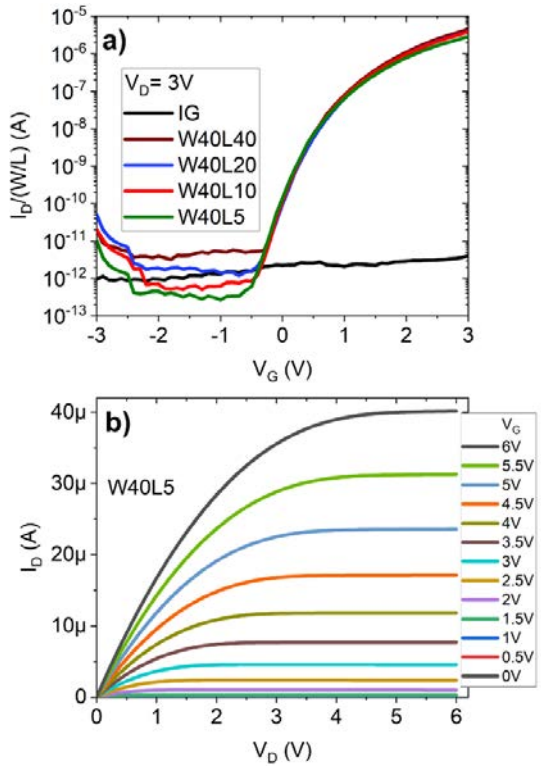


Figura 3 a) Curva transferencial, b) curvas de salidas para los TFTs de IGZO.

En la Figura 3 se muestran las curvas transferenciales normalizadas con W/L. Se puede observar, que para voltajes positivos de V_D, una uniformidad en la corriente de drenador (I_D) lo cual indica que los parámetros eléctricos son independientes de las dimensiones del transistor, mientras que para voltajes negativos de V_G la corriente de apagado (o de inversa) incrementa con las dimensiones del transistor. También se observan las curvas de salida que nos permiten ver la modulación del canal a diferentes voltajes de compuerta e identificar de manera cualitativa una baja resistencia de contacto al comenzar todas las curvas en 0 V y tener un crecimiento lineal a bajos voltajes de drenador (V_D). También se puede observar una buena saturación de la corriente que esta relacionado con el "pinch-off" del canal.

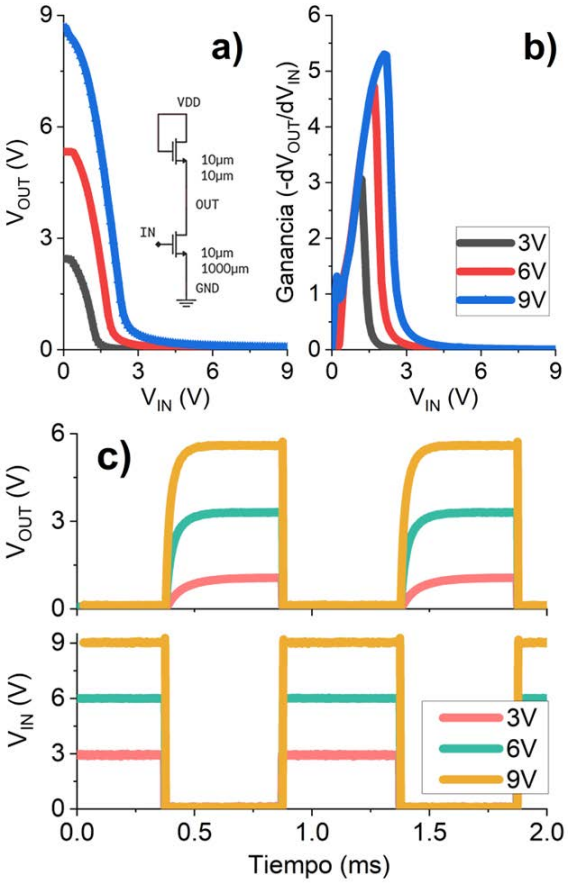


Figura 4 a) Respuesta en DC con diagrama esquemático, b) ganancia, y c) respuesta en AC para los inversores lógicos.

En la Figura 4 se muestran los resultados de un inversor lógico con la configuración de carga saturada usando los transistores en modo de enriquecimiento canal-n, véase diagrama esquemático. Se muestra la característica de transferencia de voltaje (VTC), gráfico del voltaje de salida (V_{OUT}) en función del voltaje de entrada (V_{IN}) aplicado, así como las curvas de ganancia de voltaje de salida para voltajes de operación (VDD) de 3 a 9 V. La ganancia obtenida a partir de la respuesta en DC para estos inversores fue de hasta 5 para un voltaje de operación de 9 V. Se obtiene una operación lógica adecuada en su respuesta AC utilizando un generador de señales y un osciloscopio adicional a diferentes voltajes de VDD, hasta frecuencias de 1kHz, cuando la entrada (IN) tiene un valor de voltaje mayor a 1V, la salida (V_{OUT}) es un valor de voltaje de 0V, y viceversa. Se encontró que a mayores frecuencias y

ISSN: 2992-8338

menores voltajes de VDD, la salida sufre de distorsión en especial en los tiempos de subida.

4. CONCLUSIONS

Se obtuvieron TFTs de IGZO con características eléctricas adecuadas y competitivas con la literatura. Sus parámetros eléctricos están en el orden de un V_{TH} de 1V, una movilidad de 5 cm^2/V-s, una Ion/Ioff de 10^6, y una SS de 200 mV/dec. El proceso de fabricación de TFTs resulta ser útil para fabricar inversores lógicos con una respuesta funcional en AC y DC. La frecuencia de operación está limitada a 1kHz por el momento, pues un mejor entendimiento de los elementos parásitos ayudará a optimizar este valor. Esta tecnología tiene el potencial de utilizarse en aplicaciones de baja frecuencia y de bajo poder de cómputo, pero también para el entrenamiento y desarrollo de talento humano.

REFERENCIAS

Biggs, J., Myers, J., Kufel, J., Ozer, E., Craske, S., Sou, A., Ramsdale, C., Williamson, K., Price, R., White, S., 2021. A natively flexible 32-bit Arm microprocessor. Nature 2021 595:7868 595, 532–536. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03625-w

Celiker, H., Sou, A., Cobb, B., Dehaene, W., Myny, K., 2022. Flex6502: A Flexible 8b Microprocessor in 0.8m Metal-Oxide Thin-Film Transistor Technology Implemented with a Complete Digital Design Flow Running Complex Assembly Code, in: Digest of Technical Papers - IEEE International Solid-State Circuits Conference. IEEE, pp. 272–274. https://doi.org/10.1109/ISSCC42614.2022.9731790

Hu, S., Lu, K., Ning, H., Zheng, Z., Zhang, H., Fang, Z., Yao, R., Xu, M., Wang, L., Lan, L., Peng, J., Lu, X., 2017. High mobility amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistor by aluminum oxide passivation layer. IEEE Electron Device Letters 38, 879–882. https://doi.org/10.1109/LED.2017.2702570

Nomura, K., Ohta, H., Ueda, K., Kamiya, T., Hirano, M., Hosono, H., 2003. Thin-Film Transistor Fabricated in Single-Crystalline Transparent Oxide Semiconductor. Science (1979) 300, 1269–1272. https://doi.org/10.1126/science.1083212

Yu, G., Wu, C.F., Lu, H., Ren, F.F., Zhang, R., Zheng, Y.D., Huang, X.M., 2015. Frequency performance of ring oscillators based on a-IGZO thin-film transistors. Chinese Physics Letters 32, 047302. https://doi.org/10.1088/0256-307X/32/4/047302

Zhu, Y., He, Y., Jiang, S., Zhu, L., Chen, C., Wan, Q., 2021. Indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistors: Materials, devices, and applications. Journal of Semiconductors. https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/3/031101

ISSN: 2992-8338

Electronic System for Measuring Electrochemical Noise in Lithium-ion Batteries.

E. Vázquez-Albarrán, A. Quezada-Centeno**, E. Carrera-Avendaño***, C. D. García-Beltrán***.*

**Universidad del Valle de México, C. Canal 1031, Miguel Hidalgo, 62580 Temixco, Mor.*
Email: A900098840@my.uvm.edu.mx
***Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Boulevard Cuauhnáhuac #566, Col. Lomas del Texcal, CP 62550 Jiutepec, Morelos.*
Email: QCAO200178@upemor.edu.mx,
****Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos.*
Email: edgardo.cap@cenidet.tecnm.mx, cgarcia@cenidet.tecnm.mx.

Abstract: In the present work different types of instrumentation are considered for the measurement of electrochemical noise from chemical energy sources, tested on lithium-ion batteries. The components substituted with respect to the initial proposal were a ceramic resistor, RC filter circuits, operational amplifiers and lithium-ion batteries from the same manufacturer.

Keywords: Electrochemical noise, lithium-ion batteries, passive low pass filter, operational amplifier.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido electroquímico (ECN) se presenta debido a fenómenos estocásticos como la ruptura de capaz pasivas de los materiales y por procesos determinísticos en la propagación del picado del material, esto ocasiona que sea un área muy estudiada para el tema de la corrosión, pero debido a que se produce en sistemas electroquímicos las baterías pueden sufrir estos mismos fenómenos.

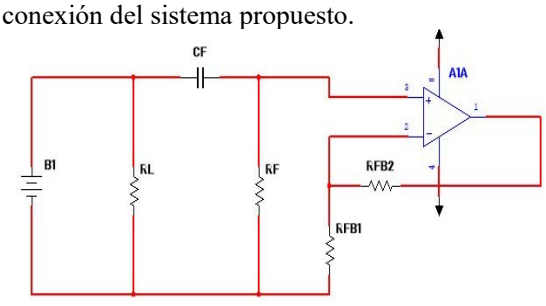
Este tema presenta una gran serie de ventajas tales como su sencillez, bajo costo y el hecho de que es un método no per-turbativo, esto quiere decir que no es necesario introducirle una señal para que nos proporcione información sobre su estado interno. El estudio del ruido electroquímico comenzó en 1968 con Warren P. Iverson cuando comenzó a estudiar las fluctuaciones de voltaje que experimentaban ciertos electrodos en soluciones de cianuro, se dio cuenta que las fluctuaciones tenían una frecuencia y amplitud determinada que dependían del metal que utilizaba. Por lo que al ruido electroquímico se les conoce a las variaciones impredecibles en el potencial o en la corriente que se pueden observar en el proceso electroquímico (Escobar et al., 1998).

Hoy en día el impacto económico de las fallas de las baterías puede ser importante cuando se utilizan en aplicaciones críticas, y se ha dedicado mucha atención a la determinación del estado de salud (SOH) de estos sistemas.

Las tecnologías de diagnóstico existentes, como las pruebas de conductancia e impedancia dan solo una respuesta parcial a esta pregunta, y el uso de enfoques alternativos parece ser muy interesante. El presente trabajo muestra resultados preliminares para la medición de ruido electroquímico (ENA) en tensión y sus posibles aplicaciones a las baterías recargables de iones de litio.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

El trabajo actual propone un sistema de bajo ruido para la medición de ruido electroquímico aplicado a la investigación de fuentes de energía química. La propuesta preliminar incluye una etapa de filtrado para eliminar señales DC las cuales no son de interés, y una etapa de amplificación para la señal de ruido. En la Figura 1, se muestra el esquema de conexión del sistema propuesto.



ISSN: 2992-8338

Figura 1. Sistema propuesto.

En la figura 1, se tienen las siguientes abreviaciones, B1: batería bajo prueba; RL—resistencia de descarga; CF—condensador de filtro; RF: resistencia del filtro; A1A (4 amplificadores en paralelo); RFB1, RFB2: resistencias de retroalimentación.

Para este trabajo solo se presenta la medición del ruido en tensión y la etapa de amplificación en condiciones de descarga durante 50 ciclos.

El ruido electroquímico se midió durante la descarga de la batería con una resistencia de valor constante. Se utilizaron distintos valores para la resistencia RL los cuales fueron: Resistencia cerámica 3.3 ohm, 7W, 5% de tolerancia y Resistencia cerámica 5.6 ohm, 5W, 5% de tolerancia.

En la etapa de filtrado, se realizaron pruebas con dos tipos de capacitores, los capacitores utilizados fueron electrolíticos y de tantalio, en el caso del capacitor electrolítico para CF se utilizó un arreglo de 1047 µf (Condensador electrolítico de aluminio 1000uF a 50V, condensador electrolítico de aluminio 47uF a 16v sku: 47uf 16v marca: Hitano), con CF de 1047 µf se realizó un arreglo de resistencias RF de 10 kΩ (resistencia de precisión, 10 kΩ, 1/4w, +-1%).

Para la etapa de amplificación (A1) se utilizaron amplificadores operacionales TL082 los cuales tienen un ruido de 18 nV/√Hz a una frecuencia de 1 KHz, las resistencias de retroalimentación R_{FB1} y R_{FB2} son resistencias de carbón de 1.5 kΩ (resistencia de carbón, 1.5 kΩ, 1/2w, +-5%) y un arreglo de resistencias de 610 kΩ (resistencia de carbón, 390 kΩ, 1/2w, +-5%, resistencia de carbón, 220 kΩ, 1/4w, +-5%) respectivamente con esta configuración la ganancia de la etapa de amplificación es de 407. Además, Se colocaron 4 capacitores en paralelo para reducir el ruido que puedan introducir en el sistema.

Para la medición se utilizó un osciloscopio digital Tektronix modelo TDS2012B el cual tiene una sensibilidad de 2mV a 50V por división, un ancho de banda de MHz y un modo de adquisición de datos promedio de hasta 128, de acuerdo con su hoja de datos, para reducir el ruido de la señal. Así como un multímetro digital Fluke modelo 179 el cual tiene una resolución máxima de 0.1 mV con una precisión de ± (0,09% + 2), de acuerdo con su hoja de datos. Un multímetro digital de banco Agilent Technologies 34401A el cual puede medir 100.000 mV con una resolución de 6 dígitos con 0,0002 % de lectura + 0,0001 % de rango de acuerdo con su hoja de datos.

Se requirió de una fuente de poder dc GW Instek modelo GPE-3323 con una salida de voltaje de 0-32 V con un ruido menor a 1mV de acuerdo a su hoja de datos, con el fin de usarla como fuente de poder simétrica para alimentar los amplificadores a 12 V y -12V.

Como batería de prueba se utilizó una batería de ion de litio Tohil modelo SD 18650 el cual tiene un voltaje nominal de 3.7 V, una capacidad nominal de 9900 mAh y un voltaje máximo de 4.2 Volts.

3. RESULTADOS

El ECN fue medido con el osciloscopio Tektronix TDS 2012B en la salida de la etapa de filtrado y después de la etapa de amplificación. Según Martemianov (2015), el nivel de ruido en las baterías de litio se encuentra en el rango de los nV, sin embargo, es importante mencionar que el campo de medida del osciloscopio utilizado es de 2 mV a 50 V, lo cual no permite obtener una medición en esos rangos de tensión. Sin embargo, se puede tener la certeza que el ruido de las fluctuaciones de tensión obtenidas, se encuentran en los rangos mencionados en la literatura, debido a los componentes de precisión que fueron utilizados para la experimentación. Lo que prioriza un sistema de adquisición de datos preciso y validar correctamente los datos obtenidos.

Las mediciones ECN se realizaron durante intervalos de 10 minutos y se graficaron en MATLAB. Se utilizaron varias configuraciones de resistencia con valores de 3.3 y 5.6 ohmios. Las gráficas de los resultados se muestran a continuación, con sus especificaciones a diferentes cargas de baterías y su estado de no amplificación, como amplificado. Se utilizo el comando subplot, para poder visualizar en una sola figura las diferentes ventanas de manera vertical y obtener una mejor comparación al momento de ejecutar el comando, esto después de obtener los datos a través del osciloscopio y pasarlos a formato Excel para poder ser procesados en Matlab.

ISSN: 2992-8338

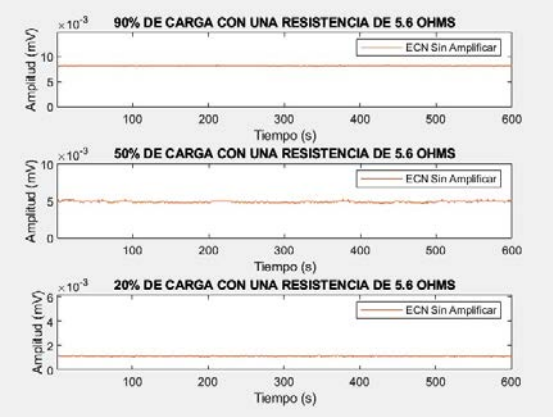


Figura 2. Salida del ECN antes de la etapa de amplificación.

Utilizando el CF de 1047 µf y RF de 10 KΩ, con una RL de 5.6 ohms, en la parte superior de la figura 2, se puede visualizar la señal de ruido electroquímico (ECN) a un SOC de 90%, en la parte media se encuentra el ECN con la batería a un SOC de 50%, y en la parte inferior se visualiza la señal ECN a un nivel de SOC de 20%. Todas las medidas se encuentran en el rango de los mV en el eje Y.

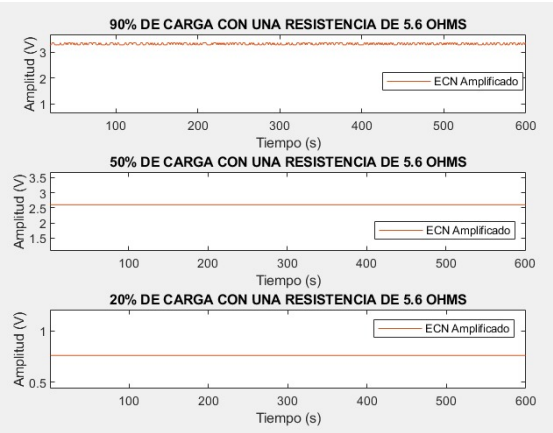


Figura 3. Salida del ECN después de la etapa de amplificación.

Con una ganancia de 407 y una RL de 5.6 ohms, en la parte superior de la figura 3, se observa el nivel de ECN a un SOC de 90%, en la parte media se observa el nivel de ECN a un SOC de 50%, y en la parte inferior se observa el nivel de ECN a un SOC de 20%. Todas las medidas se encuentran en el rango de los V en el eje Y y en el eje X el tiempo en segundos.

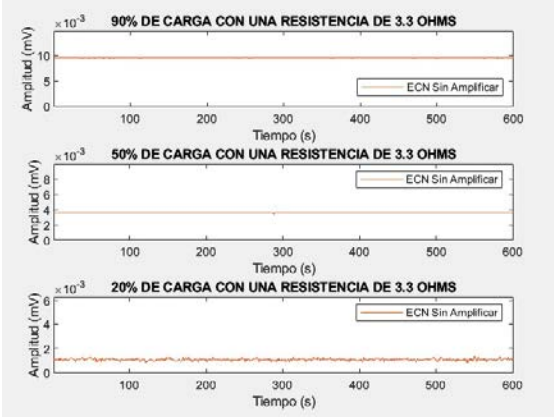


Figura 4. Salida del ECN antes de la etapa de amplificación.

Utilizando el CF de 1047 µf y RF de 10 KΩ, con una RL de 3.3 ohms, en la parte superior de la figura 4, se observa el ECN a un SOC de 90%, en la parte media se observa el ECN a un SOC de 50%, en la parte inferior se visualiza el ECN a un SOC de 20%.

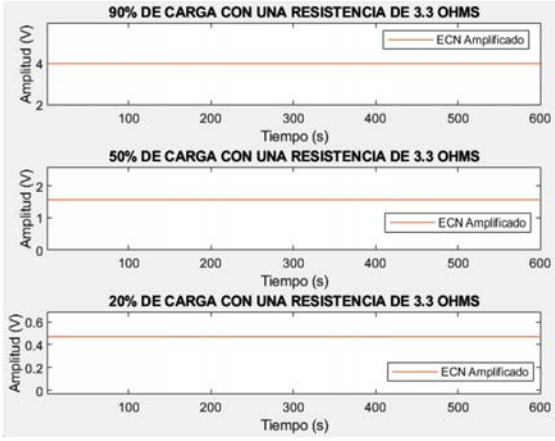


Figura 5. Salida del ECN después de la etapa de amplificación.

Con una ganancia de 407 y una RL de 3.3 ohms, en la parte superior de la figura 5, se visualiza el nivel de ECN a un SOC de 90%, en la parte media se visualiza el ECN a un SOC de 50%, y en la parte inferior se visualiza el nivel de ECN a un SOC de 20%.

Es interesante ver el comportamiento de la señal de salida con el pequeño cambio implementado en la resistencia de descarga, con el SOC de la batería al 90% puede observarse un leve incremento en la amplitud de la señal sin amplificar, esto debe ser al cambio de RL de 5.6 ohms a 3.3 ohms, al disminuir

ISSN: 2992-8338

la resistencia aumenta el ECN se ve afectado con un leve aumento, esto también hace que la descarga rápida provista con una carga de 3.3 Ω es levemente más ruidosa que la lenta con una carga de 5.6 Ω.

Con la excepción de la comparación con el SOC de la batería en un 50% lo cual da un resultado similar a la literatura (Martemianov et al., 2015) en el que mencionan la reproducibilidad de sus pruebas con un 55% de SOC y mencionando que Se nota una diferencia para el voltaje de arranque entre descargas con carga de 5.5 Ω y 3.3 Ω, pero las curvas de descarga son las mismas. Además, ellos mencionan que no tienen conocimiento información previa de la experimentación en esas condiciones.

La estrategia que se utilizó con el uso de dispositivos de medición con niveles de ruido reducidos o prácticamente despreciables que pueden ser introducidos en el sistema incluyendo el uso de la adquisición promedio de datos incorporada en el osciloscopio ayuda a disminuir el ruido de la señal, el leve ruido que puede llegar a introducir el ambiente es despreciable.

Pero esa no es razón suficiente para que descartemos el hecho de implementar una jaula de Faraday, Este enfoque adicional garantizará que la señal de salida obtenida sea completamente representativa del ECN de la batería, proporcionando así un nivel adicional de certeza y confiabilidad en las mediciones. La implementación de esta medida de mitigación refleja el compromiso con la obtención de datos precisos y fiables en el proceso de medición.

4. CONCLUCIONES

En este trabajo se propone un circuito electrónico para la medición del ruido electroquímico (ECN) en baterías de iones de litio, de acuerdo a toda la literatura se tiene un circuito pensado en el cual se proceden a hacer pruebas con distinta instrumentación. Con distintas configuraciones en los elementos del circuito se puede apreciar el cambio en el comportamiento de la señal del ruido electroquímico (ECN) lo que nos puede dar a entender que con una combinación de componentes puede darnos una señal más fácil de manejar o con un ruido menor, es más fácil notable ver como la señal cambia en la etapa de amplificación, hay varias combinaciones que se han pensado y algunas implementado para ver su comportamiento y discutir si el resultado es más satisfactorio que alguna prueba anterior, de lo contrario descartarla y discutir el motivo.

En este contexto, se ha explorado únicamente dos configuraciones de capacitores y un tipo específico de amplificador. La observación detallada de estos experimentos ha revelado un sutil incremento en la señal de salida en la etapa de filtrado, como se observó se vio un leve incremento en la señal de salida de la etapa de filtrado.

Este enfoque exploratorio abre una perspectiva valiosa para entender mejor la influencia de la selección de componentes en la señal de salida, proporcionando un camino hacia la optimización de la configuración para obtener los resultados más precisos y representativos en el contexto del proyecto, por ejemplo usando capacitores de tantalio lo que a su vez llevara a una RF distinta para mantener la frecuencia de corte del filtro, Además, se contempla la variación de resistencias RL, considerando valores más elevados e incluso menores. Este enfoque permitirá explorar en qué medida estos cambios en los componentes afectan la señal ECN.

Es crucial destacar que cualquier ajuste realizado debe garantizar la constancia de la frecuencia de corte del filtro para evitar que haya una desviación en los resultados obtenidos. Además, los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser útiles para futuras investigaciones en el campo de las baterías de iones de litio. La optimización del circuito propuesto puede mejorar la precisión de la medición de ECN y, por lo tanto, mejorar la eficiencia de las baterías de iones de litio.

En resumen, el circuito propuesto en este trabajo es una herramienta valiosa para la medición de ECN en baterías de iones de litio. Los resultados obtenidos pueden ser útiles para futuras investigaciones en el campo de las baterías de iones de litio y la optimización del circuito puede mejorar la precisión de la medición de ECN y la eficiencia de las baterías de iones de litio.

ISSN: 2992-8338

5. REFERENCIAS

Abdel-Monem, M., Trad, K., Omar, N., Hegazy, O., Van den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2017). Influence analysis of static and dynamic fast-charging current profiles on ageing performance of commercial lithium-ion batteries. Energy, 120, 179–191. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.12.110

Astafev, E. A. (2020). The measurement of electrochemical noise of a Li-ion battery during charge-discharge cycling. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 154. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107492

Astafev, E. A., Ukshe, A. E., & Dobrovolsky, Y. A. (2018). Measurement of electrochemical noise of a Li/MnO2 primary lithium battery. Journal of Solid State Electrochemistry, 22(11), 3597–3606. https://doi.org/10.1007/s10008-018-4074-0

Escobar, D., Calderón, J., & Minotas, J. (1998). Estudio de la corrosión mediante la técnica de ruido electroquímico. Revista ION, 15(1), 13–23. https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-ion/articulo/estudio-de-la-corrosion-mediante-la-tecnica-de-ruido-electroquimico

Galeotti, M., Cinà, L., Giammanco, C., Cordiner, S., & Di Carlo, A. (2015). Performance analysis and SOH (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy. Energy, 89, 678–686. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.05.148

Knott, K. F. (1965). Measurement of battery noise and resistor-current noise at subaudio frequencies. Electronics Letters, 1(5), 132. https://doi.org/10.1049/el:19650123

Martemianov, S., Adiutantov, N., Evdokimov, Y. K., Madier, L., Maillard, F., & Thomas, A. (2015). New methodology of electrochemical noise analysis and applications for commercial Li-ion batteries. Journal of Solid State Electrochemistry, 19(9), 2803–2810. https://doi.org/10.1007/S10008-015-2855-2/METRICS

Middlemiss, L. A., Rennie, A. J. R., Sayers, R., & West, A. R. (2020). Characterisation of batteries by electrochemical impedance spectroscopy. Energy Reports, 6, 232–241. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.029

Rubio, M. A., Urquia, A., & Dormido, S. (2007). Diagnosis of PEM fuel cells through current interruption. Journal of Power Sources, 171(2), 670–677. https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2007.06.072

Tant, S., Rosini, S., Thivel, P. X., Druart, F., Rakotondrainibe, A., Geneston, T., & Bultel, Y. (2014). An algorithm for diagnosis of proton exchange membrane fuel cells by electrochemical impedance spectroscopy. Electrochimica Acta, 135, 368–379. https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2014.04.108

Tyagai, V. A. (1971). Faradaic noise of complex electrochemical reactions. Electrochimica Acta, 16(10), 1647–1654. https://doi.org/10.1016/0013-4686(71)85075-2

Watanabe, H., Uemori, M., Shitanda, I., & Itagaki, M. (2022). Determination of electrochemical impedance of lithium-ion battery from charge curve by wavelet transformation. Electrochimica Acta, 428, 1–35. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140957

ISSN: 2992-8338

Equivalent Circuit Models for Lithium Batteries: A Perspective for Impedance Calculation

R. Muñoz-Sánchez, * P. U. Solano-Gutiérrez, ** E. Carrera-Avendaño, *C. D. García-Beltrán *

**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: {m23ce015, edgardo.cap, carlos.gb}@cenidet.tecnm.mx)*

***Universidad Politécnica del Estado de Morelos, P.° Cuauhnáhuac 566, Lomas del Texcal, C.P. 62574, Jiutepec, Morelos, México. (e-mail: sgpo200003@upemor.edu.mx)*

Abstract: Lithium-ion batteries have emerged as a preeminent source of energy, playing an essential role in a variety of applications. Battery modeling based on equivalent circuits has become increasingly popular due to its simplicity and effectiveness in simulating dynamics in lithium-ion batteries. Electrochemical impedance spectroscopy is a tool that establishes a relationship with the internal processes within a lithium-ion battery cell through impedance at different frequencies. This process typically takes a considerable amount of time. Therefore, this article aims to find a suitable perturbation signal and an efficient impedance calculation algorithm. Additionally, it seeks to compare and analyze the performance of different states of charge (SOC) in two different equivalent circuit models (ECM).

Keywords: Electrochemical Impedance Spectroscopy, Equivalent Circuit Model, State of Charge.

1. INTRODUCCIÓN

Una batería de ion litio (LIB) es un tipo de batería recargable ampliamente utilizada en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos debido a su alta densidad de energía y capacidad de retener carga. Este tipo de batería funciona a través del intercambio de iones de litio entre dos electrodos, liberando energía durante la descarga y almacenándola durante la recarga (Hannan et al., 2018).

En (Lazanas et al., 2023) menciona que la impedancia interna de las baterías de este tipo de baterías es un parámetro fundamental que puede influir en el desempeño de la batería. En este contexto, la impedancia se debe a la resistencia al flujo de corriente dentro de la batería lo que puede provocar sobretensiones durante la carga y descarga.

Esta impedancia obtenida de las LIB tiende a aumentar debido a la degradación de los distintos componentes internos de la batería como lo son: los materiales de los electrodos, el electrolito y los contactos eléctricos dentro de la celda (Nina et al., 2020). Debido a lo mencionado anteriormente la importancia de calcular la impedancia es una opción fundamental en una batería para estimar el estado de carga (SOC), estado de salud (SOH), entre otros.

Para poder calcular esta impedancia generalmente se usa la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) el cual es un método no intrusivo para la caracterización de las LIB como herramienta de diagnóstico o pronostico, principalmente para garantizar la calidad de la batería, estimar el SOC, estimar el SOH, el monitoreo de la temperatura, etc.

Según (Nina et al., 2020), esta impedancia se puede calcular mediante métodos experimentales o mediante la simulación de modelos de circuito equivalente (ECM). Estos modelos simplificados representan varios comportamientos físicos de la batería, como transferencia de cargas, procesos difusivos y comportamiento capacitivo de doble capa. Los ECM utilizan componentes pasivos como resistencias, capacitores e inductancias, que se conectan en serie o en paralelo utilizando mallas RC para representar estos comportamientos físicos.

Generalmente la impedancia calculada se puede representar en diagramas de Bode (donde la magnitud y la fase, o las partes real e imaginaria se trazan en función de la frecuencia), o en diagramas de Nyquist (donde la parte imaginaria de la impedancia se traza contra la parte real).

2. ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

La EIS es un método no intrusivo fundamental para la caracterización de LIB, utilizada como herramienta de diagnóstico o pronóstico para garantizar la calidad de la batería, estimar el SOC, SOH y para el monitoreo de la temperatura interna (Nina et al., 2020).

En las mediciones EIS convencionales, se aplica una perturbación senoidal en modo potenciostático (si la señal es de voltaje) o galvanostático (si la señal es de corriente) a un sistema electroquímico en un amplio rango de frecuencias. Posteriormente, se registra la respuesta del sistema ante la perturbación aplicada (Lazanas et al., 2023).

Los requisitos clave para una medición de EIS válida son linealidad, causalidad y estacionariedad. A pesar de que los sistemas electroquímicos son inherentemente no lineales, una pequeña perturbación asegura una respuesta lineal con la misma frecuencia que la señal de perturbación, reduciendo

ISSN: 2992-8338

contribuciones de armónicos superiores. En sistemas como las LIB, se emplea el modo potenciostático con una perturbación de voltaje de 5-25 mV para mantener la linealidad de la respuesta del sistema (Lazanas et al., 2023).

En las LIB, el rango de frecuencias crítico para las mediciones de EIS va de 10 mHz a 10 kHz. Esto se debe a que diversos factores externos, como la carga y descarga de la doble capa eléctrica, las reacciones farádicas y los procesos de difusión, influyen en las mediciones espectroscópicas de impedancia. Estos procesos son fundamentales para comprender el comportamiento de las baterías de iones de litio en diversas condiciones de funcionamiento, por lo que este rango de frecuencias es esencial para su caracterización precisa (Lazanas et al., 2023).

3. MODELOS DE CIRCUITO EQUIVALENTES

Los modelos de circuito equivalentes (ECM) son herramientas fundamentales en la ingeniería eléctrica para representar de manera simplificada el comportamiento de dispositivos eléctricos y componentes en sistemas complejos.

En el contexto del envejecimiento de una LIB generalmente se recurre a los ECM y a la caracterización de la impedancia, ya que estos modelos pueden reducir la complejidad del comportamiento de la batería en componentes eléctricos más simples. Como resistencias, capacitancias e inductancias. Al observar cómo estos componentes varían con el tiempo, es posible obtener información valiosa sobre el envejecimiento de la batería (Nina et al., 2020).

Generalmente los ECM se utilizan en la EIS para conectar elementos de circuitos y ajustar sus parámetros a fin de minimizar las diferencias entre los espectros de impedancia medidos y simulados. Los ECM son populares por su facilidad de configuración y menor costo computacional en comparación con los modelos físico-químicos. Se emplean para estimar SOC, SOH y el estado de potencia (SOP) en tiempo real, lo que es crucial para el control y la gestión de baterías en aplicaciones como almacenamiento de energía y vehículos eléctricos. (Nina et al., 2020). Los ECM pueden variar en complejidad, existen modelos simples que utilizan una fuente de voltaje en serie con una resistencia, hasta modelos más complejos que utilizan mallas de resistencias y capacitores en paralelo para capturar la dinámica de los procesos electroquímicos (Lazanas et al., 2023).

3.1 Modelo de resistencia interna (Rint)

El modelo Rint es un ECM utilizado para estimar el SOC y el SOP en las LIB. Este modelo considera que la batería puede ser representada como una fuente de voltaje en serie con una resistencia interna (Rint). La fuente de voltaje representa el voltaje a circuito abierto (OCV) de la batería en función del SOC, mientras que la resistencia interna describe las pérdidas óhmicas dentro de la batería. (Nejad et al., 2016).

Esta estructura de modelo y fácil de implementar en tiempo real, pero tiende a tener errores significativos debido a la falta de capacidad para capturar la dinámica subyacente de los procesos electroquímicos y termodinámicos (Nejad et al., 2016).

El valor de la Rint depende del modelo de la batería y del estado en que se encuentre, por lo que el valor es distinto para cada batería, temperatura, estado de carga y llega a depender del envejecimiento cíclico de la batería. Para el caso del SOC el valor de la Rint llega a tener variaciones significativas con bajos niveles de carga (Jiang et al., 2015).

A continuación, se muestra el esquema de este modelo:

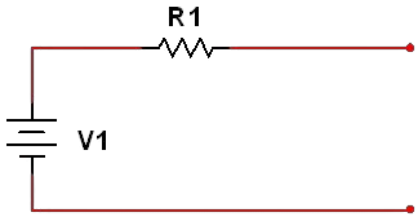


Figura 1. Modelo de resistencia interna (Rint).

Donde:

- V1 representa el OCV en función del SOC de la batería.
- R1 representa la resistencia interna debido a la resistencia de los electrolitos y los electrodos.

3.2 Modelo de Thévenin

El modelo de Thévenin es una variante del modelo Rint utilizado para describir el comportamiento de una LIB. En este modelo, se utiliza una fuente de voltaje ideal para representar el OCV de la batería en relación con el SOC. Además, incluye una resistencia en serie y una malla RC para proporcionar una representación más completa del comportamiento de la batería.

La resistencia en serie (Rint) está relacionada con el transporte de cargas en la batería y es influenciada tanto por la conducción de electrones como por la de iones. Su conductividad se ve afectada por varios factores, incluyendo la conductividad del electrolito, la presencia de colectores de corriente y posibles modificaciones introducidas por aditivos para mejorar la conductividad electrónica. La conductividad electrónica depende de los materiales activos en los electrodos y afecta la resistividad interna de la batería, que varía con la temperatura, el SOC y los ciclos de trabajo. Los valores típicos de esta resistencia suelen estar en el rango de μΩ a Ω. (Pico et al., 2018).

Los demás elementos representados en la malla RC están relacionados con la Interfaz Electrolítica Sólida (SEI) que se forma en la batería. El capacitor en el modelo representa la capacitancia de doble capa que se genera cuando existe una diferencia de potencial entre los electrodos y la solución, lo que lleva a la absorción de iones. Este fenómeno se aplica tanto al cátodo como al ánodo, considerando la separación de cargas entre las capas del electrodo y el electrolito. El capacitor se utiliza para modelar cómo la batería recupera su voltaje cuando se somete a una corriente distinta de cero. Los valores típicos para este parámetro se encuentran en un rango que va desde μF a kF. (Pico et al., 2018).

ISSN: 2992-8338

Por otro lado, la resistencia en paralelo con el capacitor representa la velocidad de transferencia de carga. Es decir, modela la reacción química en el electrodo que involucra el intercambio o transferencia de cargas. Las magnitudes típicas para este parámetro oscilan entre μΩ a Ω (Pico et al., 2018).

A continuación, se muestra el esquema de este modelo:

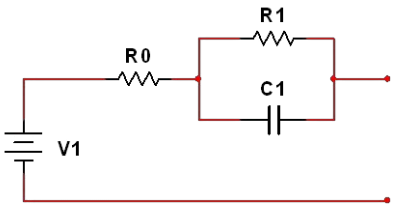


Figura 2. Modelo de Thévenin.

Donde:

- V1 representa el OCV en función del SOC de la batería.
- R0 representa la resistencia interna debido a la resistencia de los electrolitos y los electrodos.
- R1 representa la resistencia SEI.
- C1 representa la capacitancia SEI.

3.3 Modelo Doble de Thévenin

El Modelo Doble de Thévenin es una mejora del modelo de Thévenin simple y consta de una segunda malla RC. Incluye una fuente de voltaje que representa el OCV de la batería y dos mallas RC. La primera malla RC está relacionada con la Interfaz Electrolítica Sólida (SEI), mientras que la segunda malla RC se relaciona con la transferencia de cargas y la capacitancia de doble capa. (Nejad et al., 2016).

La precisión y el esfuerzo computacional de estos modelos dependen del número de bloques RC. A medida que aumenta la cantidad de pares RC, la precisión también aumenta, pero al mismo tiempo, el tiempo de cálculo se incrementa. Para abordar tanto los procesos electroquímicos rápidos como los lentos en una batería, se prefiere utilizar un modelo de Thévenin de segundo orden en lugar de uno que utilice un solo bloque RC (Rizzello et al., 2020).

En este modelo, el OCV de la batería se representa con una fuente de voltaje, y la resistencia interna de la batería se representa con una resistencia llamada Rint. Las baterías LIB exhiben un comportamiento no lineal y no estacionario debido a la polarización de activación y la polarización de concentración. Este modelo aborda estos fenómenos utilizando dos bloques RC. El primer bloque RC representa el sobrepotencial de activación, que se relaciona con la energía de activación necesaria para las reacciones electroquímicas en la batería. El segundo bloque RC se encarga de la polarización de transporte de masa, que refleja la caída de voltaje debido al gradiente de concentración en el interior de la batería. (Rizzello et al., 2020).

Es importante destacar que todos los parámetros mencionados anteriormente son sensibles a la temperatura, el estado de carga (SOC) y la corriente. Por lo tanto, para lograr una caracterización eléctrica y térmica completa de la batería, es necesario utilizar un modelo de alta precisión y llevar a cabo numerosas pruebas (Rizzello et al., 2020).

A continuación, se muestra el esquema de este modelo:

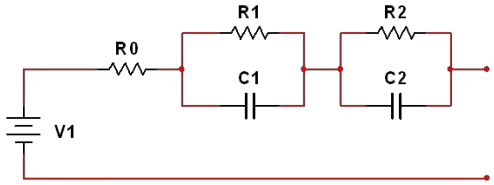


Figura 3. Modelo Doble de Thévenin.

Donde:

- V1 representa el OCV en función del SOC de la batería.
- R0 representa la resistencia interna debido a la resistencia de los electrolitos y los electrodos.
- R1 representa la resistencia SEI.
- C1 representa la capacitancia SEI.
- R2 representa la resistencia de la transferencia de carga (CT).
- C2 representa la capacitancia de doble capa (DL).

4. REPRESENTACIÓN DE LA IMPEDANCIA EN EL DIAGRAMA DE NYQUIST

El diagrama de Nyquist es una herramienta valiosa para representar la impedancia de una batería de iones de litio y comprender su comportamiento eléctrico en función de la frecuencia. Ayuda a visualizar la relación entre las partes real e imaginaria de la impedancia y facilita la comprensión de los procesos químicos y físicos en la batería. Este tipo de gráfico se utiliza ampliamente en electroquímica para el análisis de sistemas de baterías. (Nina et al., 2020).

En general, las diferentes regiones en el diagrama de Nyquist reflejan los procesos que ocurren en las LIB. Esta representación se combina con el modelo de circuito equivalente correspondiente para analizar las características de las baterías. La elección del ECM es crucial, ya que afecta la representación de la impedancia en el gráfico de Nyquist. A continuación, se muestra cómo se refleja esta variación en el gráfico de Nyquist.

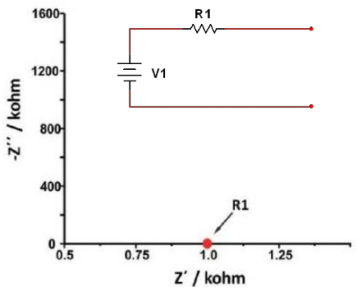


Figura 4. Gráfico de Nyquist correspondiente al ECM Rint.

Cuando el ECM consta de una sola resistencia (R1), la parte real de la impedancia es igual a R1 y la parte imaginaria es cero. Esto se refleja en un gráfico de Nyquist como un único punto en el eje real, lo que significa que la impedancia es igual

ISSN: 2992-8338

en todas las frecuencias de excitación y coincide con el valor de la resistencia interna (R1) de la batería. En este caso, el gráfico de Nyquist es simple y muestra un comportamiento resistivo en todas las frecuencias. (Lazanas et al., 2023).

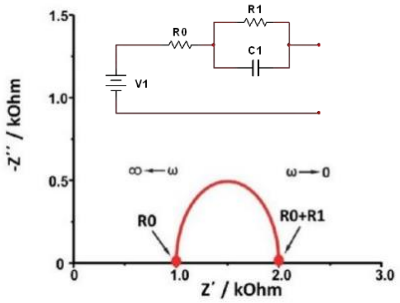


Figura 5. Gráfico de Nyquist correspondiente al ECM de Thévenin.

En el Modelo de Thévenin, el circuito se comporta de manera predominantemente resistiva, lo que se refleja en un gráfico de Nyquist como un semicírculo que se desplaza hacia el eje real con un valor igual a la resistencia interna (R0) de la batería. En este diagrama, las frecuencias altas se representan cerca del valor de la resistencia interna, mientras que las frecuencias bajas se encuentran más alejadas del eje real y están relacionadas con la suma de la resistencia interna (R0) y la resistencia SEI. En resumen, el gráfico de Nyquist en el Modelo de Thévenin refleja una combinación de la resistencia interna y la resistencia SEI en función de la frecuencia. (Lazanas et al., 2023).

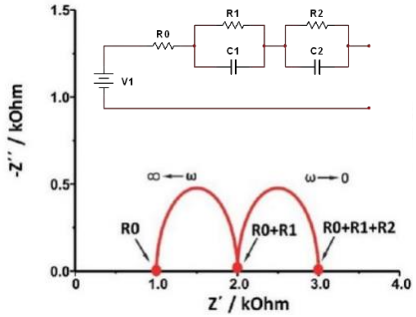


Figura 6. Gráfico de Nyquist correspondiente al ECM Doble de Thévenin.

Este gráfico de Nyquist, en comparación con el anterior, muestra una representación detallada de diferentes frecuencias. En las frecuencias altas, se relaciona con la resistencia interna de la batería (R0). En las frecuencias medias-altas, se refleja la resistencia de la capa SEI a través de un arco relacionado con la primera malla RC del Modelo Doble de Thévenin. En las frecuencias medias-bajas, se describe el proceso de transferencia de carga en la reacción del electrodo, donde una doble capa en la interfaz se modela como un capacitor (C2) y la resistencia (R2) representa la resistencia de transferencia de carga en esta región del gráfico. (Liu et al., 2023).

5. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA EIS CON ECM EN CONDICIONDES DE CARGA Y DESCARGA

La técnica de EIS implica aplicar un voltaje o corriente senoidal a la batería y registrar su respuesta a diferentes frecuencias para obtener el espectro de impedancia. Sin embargo, este proceso es lento ya que se realiza a frecuencias discretas una por una. Para acelerar el proceso, se utiliza la excitación en el dominio del tiempo, donde se emplea una señal multiseno para excitar al circuito equivalente de la batería. Luego, se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para convertir estas señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y se representa la impedancia en un gráfico de Nyquist. (Lyu et al., 2018).

Este enfoque ofrece la ventaja de acelerar significativamente el proceso de caracterización de la batería al permitir la medición simultánea de múltiples frecuencias de excitación, en contraposición a la medición secuencial usando una frecuencia a la vez.

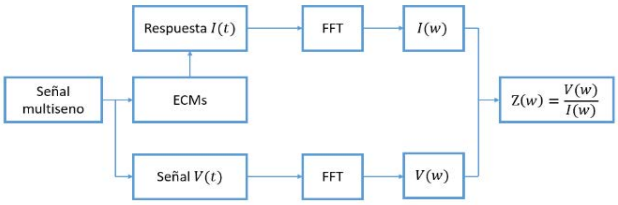


Figura 7. Descripción de la técnica de medición en el dominio del tiempo de EIS basado en la FTT.

Para emplear esta técnica se hace uso del método potenciostático, introduciendo una señal de voltaje AC a un ECM mediante simulación, en este caso los ECM simulados fueron el de Thévenin y el Doble de Thévenin. La simulación se realizó mediante el software MATLAB/Simulink.

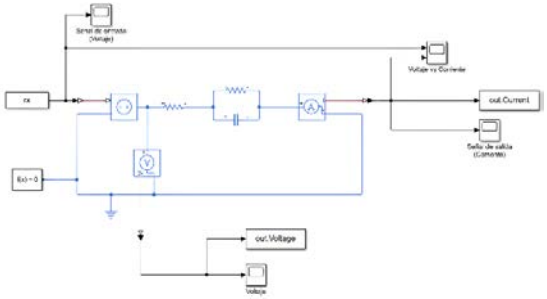


Figura 8. ECM de Thévenin construido en MATLAB/Simulink.

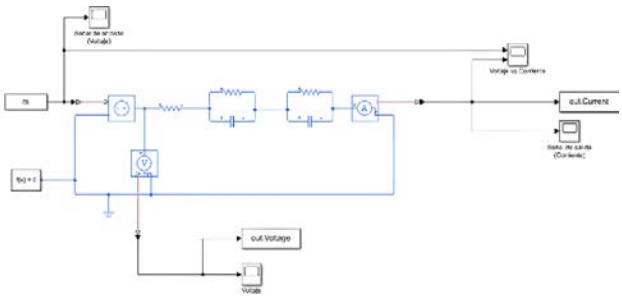


Figura 9. ECM Doble de Thévenin construido en MATLAB/Simulink.

ISSN: 2992-8338

Estos modelos elaborados en Simulink contiene una fuente de voltaje controlada donde se aplica la señal de perturbación mediante el bloque "From Workspace", el cual se elaboró en MATLAB. Esta señal es multiseno e incluye frecuencias de 10 mHz a 10 kHz haciendo el barrido de frecuencias a 10 puntos por década. La señal de perturbación (Voltaje) se muestra a continuación:

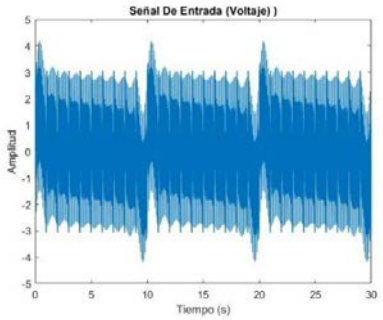


Figura 10. Señal de perturbación (Voltaje).

En la simulación se incluyen sensores de corriente y voltaje los cuales son los encargados de recopilar los datos de voltaje y corriente para después aplicarle la FFT para obtener la impedancia del ECM y trazarlo en el gráfico de Nyquist.

5.1 Resultados en condición de carga

Para analizar la impedancia y el comportamiento del gráfico de Nyquist en condición de carga se tomaron datos experimentales para poden calcular los valores de los parámetros del ECM de Thévenin y doble de Thévenin reportadas en (Vyrouba et al., 2018), los cuales se muestran en la siguiente tabla:

SOC [%]	Voc [V]	Rs [Ω]	R1 [Ω]	C1 [F]	R2 [Ω]	C2 [F]
1	4.19785	0.01879	0.002278	4.6990	0.001542	1.266
0.75	3.94147	0.01878	0.002328	3.9170	0.001466	1.259
0.5	3.80990	0.01885	0.003221	4.4160	0.001751	1.189
0.25	3.72448	0.01889	0.002096	1.2520	0.006020	5.118
0	3.02384	0.01906	0.003355	1.5710	0.022690	4.880

Tabla 1. Parámetros calculados experimentalmente en carga

Se obtuvieron los gráficos de Nyquist de ambos ECM analizados, los cuales se presentan a continuación:

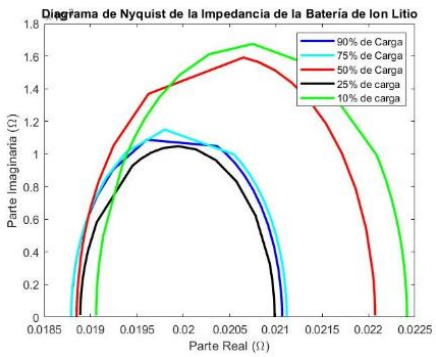


Figura 11. Diagrama de Nyquist para el ECM de Thévenin en carga.

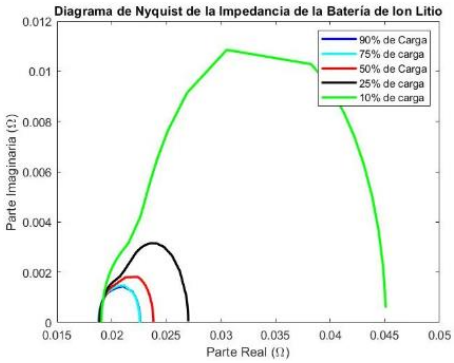


Figura 12. Diagrama de Nyquist para el ECM Doble de Thévenin en carga.

Durante la carga, se observa una disminución en la amplitud de la impedancia en los gráficos de Nyquist. En el ECM de Thévenin, a medida que el SOC aumenta, la resistencia interna disminuye, desplazando el gráfico hacia la izquierda. También se ve un arco en frecuencias medias-altas que disminuye con el SOC, relacionado con la capa SEI. En el ECM Doble de Thévenin, se observa un desplazamiento similar hacia la izquierda y dos semiarcos en el gráfico. El primero está relacionado con la capa SEI, y el segundo, en frecuencias medias-bajas, se asocia a la resistencia de transferencia de carga y la capacitancia eléctrica de doble capa, disminuyendo con el aumento del SOC.

5.2 Resultados en condición de descarga

De igual forma los parámetros en condición en descarga se reportan en (Vyrouba et al., 2018).

SOC [%]	Voc [V]	Rs [Ω]	R1 [Ω]	C1 [F]	R2 [Ω]	C2 [F]
1	4.195754	0.01889	0.001540	1.241	0.002314	4.626
0.75	3.920000	0.01889	0.002425	4.378	0.001645	1.193
0.5	3.790000	0.01889	0.003286	4.734	0.001850	1.181
0.25	3.678890	0.01895	0.002222	1.281	0.007209	5.312
0	3.008480	0.01902	0.002970	1.591	0.021300	4.857

Tabla 2. Parámetros calculados experimentalmente en descarga

Se obtuvieron los gráficos de Nyquist de ambos ECM analizados, los cuales se presentan a continuación:

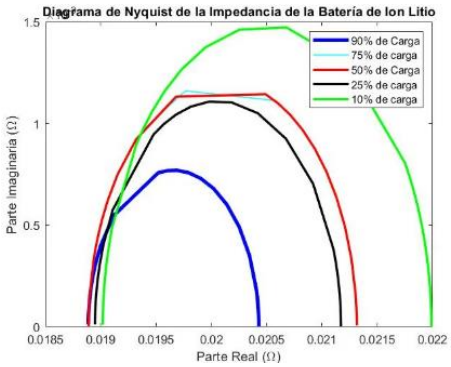


Figura 13. Diagrama de Nyquist para el ECM de Thévenin en descarga.

ISSN: 2992-8338

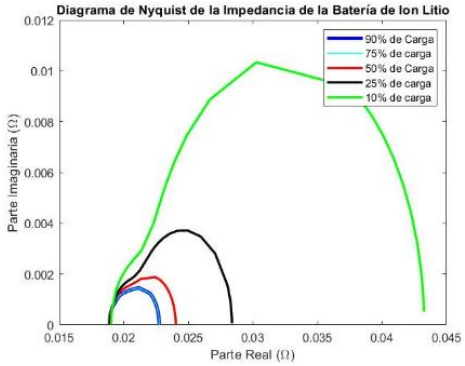


Figura 14. Diagrama de Nyquist para el ECM Doble de Thévenin en descarga.

En condición de descarga, la amplitud de la impedancia aumenta el cual, está relacionado con el aumento de la resistencia interna de la batería, lo cual, provoca que el gráfico de Nyquist se desplace hacia la derecha, de igual forma para ambos ECM existe una relación con la disponibilidad de iones de litio en la interfaz electrodo-electrolito. Para el caso del ECM Doble de Thévenin el segundo arco tiende a incrementar, lo que me indica un aumento en la resistencia de transferencia de carga y la capacitancia de la doble capa cuando el SOC disminuye.

6. CONCLUSIONES

El estado de carga de la batería (SOC) es un factor crítico que ejerce una influencia significativa en el cálculo de la impedancia en modelos de circuito equivalente como el de Thévenin y el Doble de Thévenin, que se emplean para caracterizar una LIB.

El SOC afecta la impedancia al influir en los componentes clave del modelo de Thévenin. A medida que el SOC disminuye con la descarga de la batería, la resistencia interna de la batería tiende a aumentar, lo que se traduce en una mayor resistencia eléctrica en este modelo. Para el caso de la resistencia de la capa SEI, a medida que el SOC cambia, la calidad, y espesor de la capa SEI varían. Una capa SEI más gruesa o con una resistencia más alta contribuirá a una mayor impedancia en la interfaz entre el electrodo y el electrolito. Además, la capacitancia puede estar relacionada con la capacidad de la batería, también se ve afectada por la disminución del SOC, lo que refleja una capacidad de almacenamiento de energía reducida.

El Modelo de Thévenin Doble ofrece una mayor precisión al modelar el comportamiento de las LIB. En este modelo, la resistencia interna de la batería aumenta a medida que disminuye el SOC. Además, puede representar la influencia del SOC en la capa SEI, que cambia a medida que la batería se carga y descarga. Con un SOC bajo (batería descargada), la formación de la capa SEI puede ser más activa debido a una mayor disponibilidad de iones de litio en la interfaz electrodo-electrolito. También puede modelar el transporte de cargas, donde un SOC bajo resulta en una mayor impedancia debido a una resistencia de transferencia de cargas más alta en las reacciones electroquímicas.

La investigación sobre baterías de ion litio es relevante para el avance tecnológico y el progreso social. Tecnológicamente, estas baterías han transformado la eficiencia y portabilidad de dispositivos electrónicos, impulsando el desarrollo de vehículos eléctricos y soluciones de almacenamiento renovable. Socialmente, han mejorado el acceso a la energía en áreas remotas. Este continuo avance no solo redefine la tecnología, sino que también promueve una sociedad más limpia y eficiente.

REFERENCIAS

Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y., & Ker, P. J. (2018). State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *Ieee Access*, *6*, 19362-19378.

Nina Meddings, Marco Heinrich, Frédéric Overney, Jong-Sook Lee, Vanesa Ruiz, Emilio Napolitano, Steffen Seitz, Gareth Hinds, Rinaldo Raccichini, Miran Gaberšček, Juyeon Park, Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review, Journal of Power Sources, Volume 480, 2020, 228742, ISSN 0378-7753, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228742.

Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). Electrochemical Impedance Spectroscopy─ A Tutorial. *ACS Measurement Science Au*.

Jiang, J., & Zhang, C. (2015). *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*. John Wiley & Sons.

Nejad, S., Gladwin, D. T., & Stone, D. A. (2016). A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery states. *Journal of Power Sources*, *316*, 183-196.

Pico, J.D., Patiño, D. and Ruiz, F. (2018) *Modelado Circuital de Baterías de LiFePo4 para Simulación*, *Repositorio Institucional Javeriano*. Available at: https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/45112/Paper%20JDPS.pdf?sequence=7 (Accessed: 01 November 2023).

Rizzello, A., Scavuzzo, S., Ferraris, A., Airale, A. G., & Carello, M. (2020, June). Temperature-Dependent Thévenin Model of a Li-Ion Battery for Automotive Management and Control. In *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)* (pp. 1-6). IEEE.

Olmo Esteban, G. (2019). Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento.

Liu, Y., Wang, L., Li, D., & Wang, K. (2023). State-of-health estimation of lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectroscopy: a review. *Protection and Control of Modern Power Systems*, *8*(1), 41.

Lyu, C., Liu, H., Luo, W., Zhang, T., & Zhao, W. (2018, October). A fast time domain measuring technique of electrochemical impedance spectroscopy based on fft. In *2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)* (pp. 450-455). IEEE.

Vyroubal, P., & Kazda, T. (2018). Equivalent circuit model parameters extraction for lithium ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Energy Storage*, *15*, 23-31.

SISTEMAS SOCIOAMBIENTALES Y SUSTENTABILIDAD

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Biomass Estimation Using Spectral Indices Derived From Sentinel-2B Satellite Imagery

J. L. Domínguez Cuevas*, D. E. Constantino Recillas*, L. A. Jiménez Ponce*, M. E. Andrade Sánchez*

***Tecnológico de Estudio Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx. (Tel: 52+ 5562574155; e-mail: jluis_1196@hotmail.com)**

Abstract: Remote sensing has been used in recent decades to monitor fields destined for planting, to care for and observe the development of these agricultural products. Satellites provide information of the Earth's surface through images generated by sensors that conform them, in that way the sensor can show what the user needs, vegetation indices are used, which are made up of equations that are compose by two or more spectral bands depending on the sensor that the satellite has. The vegetation indices allow to stand out the biomass of the agricultural fields and as a result it´ll achieve a correct monitoring for the care of the products obtained from this type of agricultural. The Sentinel-2 satellite is one of the most widely used for crop monitoring due to the wide spectral range of the sensor that this satellite has, so it will be implemented for the detection of vegetation moisture over corn fields in Huamantla, Mex., applying the vegetation index NDWI (Normalized Difference Water Index) with different spatial resolution. The methodology used for this work showed a maximum difference of 1kg/m^2 by the random component of the error for the different monitored crop fields.

Keywords: Remote Sensing, Sentinel-2B, Vegetation Humidity, Spectral Band, Vegetation Index.

1. INTRODUCCION

Los campos agrícolas son de gran importancia para la humanidad ya que estos proveen de alimentos y materias primas para la sociedad, así como, el gran impacto a nivel económico en diferentes regiones del planeta. De acuerdo con Conagua menciona que en el 2021 México conto con 18.7 millones de hectáreas de superficie cosechada de las cuales el 25% son de riego y el 75% depende de las lluvias de temporada. Durante el año 2019 el PIB del sector primario en México de acuerdo con el INEGI fue de 828,217 millones de pesos corrientes (INEGI, 2019). La falta información para la gestión de los recursos en los campos agrícolas puede provocar gastos innecesarios en algunos insumos para su cuidado, estos gastos perjudican directamente a los agricultores y a la vez puede causar un alce en los precios de los productos agrícolas perjudicando a los consumidores. La mayoría de los agricultores siembran de acuerdo con la experiencia obtenida o por los conocimientos heredados, lo que provoca que en ocasiones ocupen insumos para los campos de manera innecesaria y esto se debe por la falta de información y capacitaciones para optimizar los productos obtenidos de los campos. La percepción remota satelital capta parámetros que pueden ayudar a conocer la condición de áreas agrícolas con la obtención y procesamiento de productos satelitales los cuales pueden abarcar grandes extensiones de terreno de manera constante, logrando interpretar el comportamiento de diferentes cultivos en una sola imagen (Gavilán Pino, 2019). En las últimas décadas diferentes países han utilizado productos satelitales para el monitoreo y la vigilancia de cultivos teniendo como resultados un incremento en su producción agrícola y en ocasiones logran reducir la porción de suelo destinada a la siembra o para mantener el vigor de la vegetación, por ejemplo; en el artículo "Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar" (Villatoro, 2019), se utilizan las imágenes capturadas por los satélites para determinar la salud, crecimiento y momento óptimo para la cosecha de la caña de azúcar con la ayuda de los índices de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para el monitoreo de la biomasa (Caña de azúcar) y con los índices NDWI (Normalized Difference Water Index) y MSI (Moisture Stress Index) que miden el porcentaje de humedad en la zona ya que uno de los factores para que la caña de azúcar se desarrolle de manera óptima por medio de la humedad que se encuentra en el suelo o la precipitación de la zona así como la temperatura del lugar. Este tipo de técnicas de percepción remota satelital pueden ser usadas para el monitoreo de los campos en países en desarrollo. Hoy en día, existen productos satelitales que las agencias espaciales internacionales distribuyen de manera gratuita a través de sus servidores, un ejemplo de esto son los satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA), esta agencia espacial cuenta con el programa Copernicus en el cual existen seis misiones con el nombre Sentinel que consiste en una red de satélites para diferentes propósitos, la misión Sentinel-2 está enfocada en la teledetección de la superficie terrestre y cuenta con dos satélites gemelos lo que permite tener una resolución temporal de 5-10 días de revisita convirtiendo esta misión en una de las más utilizadas para el monitoreo de cultivos gracias al sensor multiespectral (MSI) que logra captar la firma espectral de los objetos que se encuentran en la superficie terrestre (Instituto Geográfico Nacional de España, 2020). La comunidad de percepción remota ha desarrollado diferentes índices espectrales que permiten visualizar la biomasa utilizando la combinación de las bandas que ofrecen las plataformas satelitales, resaltando la vegetación o parámetros relacionados al desarrollo de la biomasa (Morell-Monzó, Estornell y Sebastiá-Frasquet, 2022). En ese sentido,

ISSN: 2992-8338

es viable la implementación de este tipo de métodos para el monitoreo de campos agrícolas. En los últimos años el estado de Tlaxcala ha sido uno de los estados con mayor producción de maíz en México convirtiendo esta región en una zona relevante para la práctica de la teledetección de los campos agrícolas y registrar el desarrollo de la vegetación. La mayor parte de los campos destinados a la siembra son de temporal es decir que la mayor parte del riego depende de las precipitaciones que se presenten en el lugar (Vargas et al., 2022). Por lo anterior, este trabajo propone utilizar los productos satelitales de la plataforma Sentinel-2 de 2018 y 2019 para estimar índices espectrales que permitan monitorear el desarrollo de cultivos de Huamantla, Mex. con base en la estimación del parámetro de humedad contenida en la vegetación.

2. ZONA DE ESTUDIO

Huamantla es uno de los municipios de Tlaxcala en que la mayor parte de sus tierras están destinadas a la siembra de maíz criollo nativo de la zona y la mayor parte de este producto se cultiva en condiciones de temporal. Los pobladores de esta zona traspasan los conocimientos obtenidos de la agricultura a las siguientes generaciones para continuar con la tradición de seguir sembrando y mantener la poca economía que se genera de la venta de los productos agrícolas, así como su propio consumo en la zona (Vargas et al., 2022). Para las tareas de fertilizar, plaguicidas y la aplicación de herbicidas requieren contratar mano de obra extra, así como el uso de maquinaria para la preparación del campo y su cuidado, los productores de Huamantla se abastecen de insumos para los cultivos de maíz de acuerdo con sus conocimientos lo que en ocasiones provoca un gasto mayor a lo necesario, esto puede deberse a la falta de capacitación o cursos para una correcta explotación de los campos y de los productos consumibles para el desarrollo del maíz.

2.1 Delimitación del área de estudio.

Se tomaron cuatro sitios dentro del municipio de Huamantla para realizar el monitoreo de los campos de maíz utilizando el sensor multiespectral del Sentinel-2B, algunos agricultores utilizan técnicas poco convencionales ocasionando el uso innecesario de recursos por lo que se espera que el satélite de seguimiento al desarrollo de las plantas de maíz.

Tabla 1. Coordenadas de los campos de estudio

	Coordenadas	
Sitio	**Longitud**	**Latitud**
Palafox-1	97°58"21.473" O	19°19'24.016" N
Palafox-2	97°56'59.76" O	19°23'8.784" N
Álvaro	97°56'52.999" O	19°18'53" N
Alfredo	97°54'13.478" O	19°21'33.967" N
Macario	97°53'57.999" O	19°18'34" N

El muestreo en la zona de estudio para cada campo de cultivo se realizó de acuerdo con los protocolos de las campañas THEMEX (Monsiváis-Huertero et al., 2022).

2.2 Selección de imágenes satelitales del Sentinel-2B

Las imágenes proporcionadas del Sentinel-2B tienen un amplio rango espectral y una resolución temporal de 5-10 días respecto al mismo sitio y contando con un sensor pasivo MSI, al ser imágenes obtenidas por un sensor pasivo estas se ven afectadas por los fenómenos atmosféricos común mente nubosidad que se encuentra en la zona que interfiere con el monitoreo ya que no permite visualizar la superficie terrestre. La selección de las imágenes se realiza desde la página del programa espacial Copernicus en donde se le permite al usuario indicar la zona de interés, el tipo de satélite a utilizar, así como el día y mes requerido, también para obtener una imagen libre de imperfecciones se le puede indicar el porcentaje de nubosidad y un filtro para corrección atmosférica.

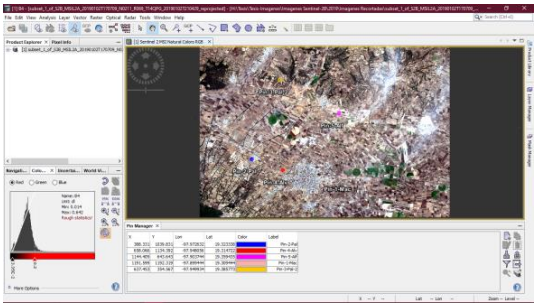


Figura 1. Selección de los sitios de estudio utilizando el software SNAP

Las imágenes seleccionadas se les tiene que aplicar un proceso conocido como “Reprojection” en el cual realiza una proyección cartográfica el cual servirá a la hora de realizar los recortes y las coordenadas indicadas representen el mismo lugar de estudio, otro proceso a realizar es la aplicación de la herramienta “Resampling” la cual se encargara que la resolución espacial de las bandas tenga el mismo tamaño de pixel para la aplicación de índices de vegetación que utilicen bandas de diferente resolución espacial, con estos procesos hechos se puede continuar con los siguientes pasos.

3. METODOLOGIA

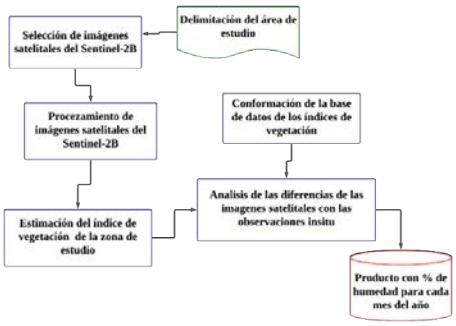


Figura 2. Metodología propuesta para la estimación de contenido de agua en la vegetación.

Para este trabajo se utilizaron productos satelitales procedentes de la plataforma satelital Sentinel-2B para el monitoreo de campos de cultivo de Huamantla, Mex. para su seguimiento en

ISSN: 2992-8338

el año 2019. En las siguientes secciones se explica a detalle el desarrollo de la metodología.

4. ESTIMACIÓN DEL INDICE DE VEGETACION DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Los índices de vegetación son las combinaciones de las bandas de diferente rango espectral con el que cuentan los sensores de los satélites, estas combinaciones se aplican a las imágenes obtenidas por el sensor del satélite, estas combinaciones se utilizan para facilitar la detección de los objetos de estudio. Las bandas del espectro electromagnético que están en el rango visible y del infrarrojo se utilizan normalmente para la observación de la superficie terrestre y gran parte de la información recolectada pertenece a la vegetación.

Tabla 2. Bandas espectrales del Sentinel-2B (Instituto Geográfico Nacional de España, 2020)

Banda Sentinel 2	Longitud de onda central (µm)	Resolución espacial (m)
Banda 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Banda 2 - Azul	0.49	10
Banda 3 - Verde	0.56	10
Banda 4 - Rojo	0.665	10
Banda 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Banda 6 - Vegetation Red Edge	0.74	20
Banda 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Banda 8 - NIR	0.842	10
Banda 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Banda 9 - Vapor de agua	0.945	60
Banda 10 - SWIR - cirros	1.375	60
Banda 11 - SWIR	1.61	20
Banda 12 - SWIR	2.19	20

Cada banda del satélite tiene características que ayudaran a estudiar los objetos de interés, por este motivo se realizan la combinación de bandas para obtener un índice de vegetación que logre un monitoreo adecuado, por ejemplo; los usuarios de los productos satélites que realizan monitoreo en los campos de cultivo utilizan varios índices para lograr una detección que se acerque a lo que hay biofísicamente en el suelo. Los índices de vegetación logran captar la biomasa y la cantidad de humedad que se encuentra en los campos agrícolas. Para este trabajo se utilizó el índice de vegetación NDWI con diferente resolución espectral (10 y 20 metros) y ocupando la herramienta **Band Maths** del software SNAP para introducir la ecuación que representa este índice (Sonobe et al., 2018).

$$(B8-B11)/(B8+B11) \quad (1)$$

$$(B8A-B12)/(B8A+B12) \quad (2)$$

Estas ecuaciones son para el satélite Sentinel-2, las dos ecuaciones utilizan bandas con diferente resolución espectral en el caso de la ecuación 1 la banda 8 (B8) cuenta con una longitud de 842 nm la cual se encuentra en el rango visible del infrarrojo cercano y con una resolución espacial de 10 m mientras la banda 11 (B11) tiene una longitud de onda de 1610 nm con una resolución espacial de 20 m pero en el rango espectral está en el rango espectral del infrarrojo corto, este caso la ecuación se realiza con bandas de diferente resolución espacial por lo que en estos casos se debe de realizar la función **Resampling** para que todas las bandas tengan una misma resolución espacial por lo que toma una resolución de 10 m. En el caso de la ecuación 2 se utilizan dos bandas la banda 8A (B8A) y la banda 12 (B12) las cuales cuentan con la misma resolución espacial de 20 m, la banda B8A con una longitud de onda de 865 nm y en un rango espectral visible del infrarrojo cercano y la B12 cuenta con una longitud de onda 2190 nm y de la misma manera se encuentra en el rango espectral del infrarrojo, como las dos bandas tienen la misma resolución espacial se puede realizar la operación sin ningún problema.

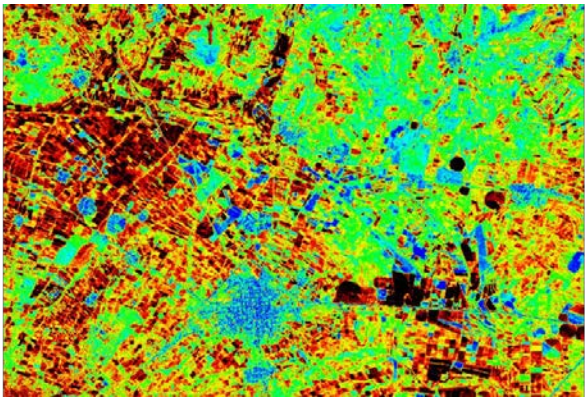


Figura 3. Imagen a falso color del índice NDW-10m utilizando la ecuación 1 en la localidad de Huamantla, Mex.

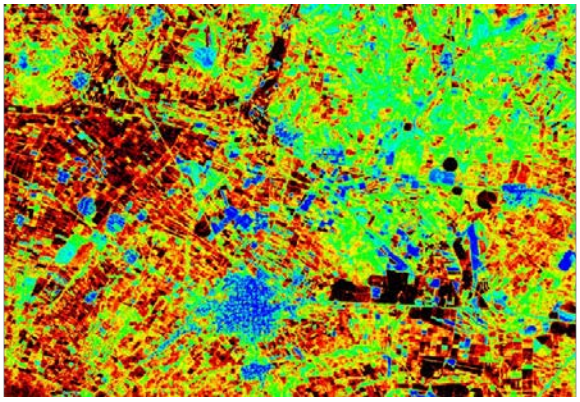


Figura 4. Imagen a falso color del índice NDWI-20 utilizando la ecuación 2 en la localidad de Huamantla, Mex.

ISSN: 2992-8338

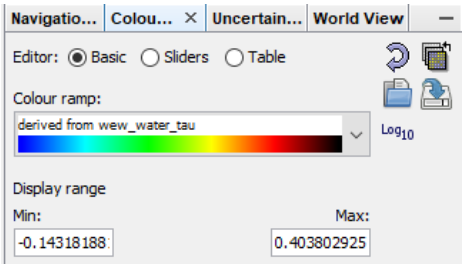


Figura 5. Segmentación de colores a falso color de los índices de vegetación donde el máximo es la concentración de humedad.

El NDWI es un índice de vegetación que se utiliza para detectar la presencia y distribución de agua de un producto satelital y se basa en la diferencia entre la reflectancia en el infrarrojo cercano y el verde, se utiliza principalmente para la detección de agua o en zonas húmedas ya que el agua absorbe la radiación en el infrarrojo cercano. El índice NDWI ha sido utilizado en estudios de cambio climático, monitoreo de recursos hídricos, seguimiento de inundaciones y principalmente para monitorear la humedad del suelo en áreas agrícolas (Gao et al., 2015).

4.1. Conformación de la base de datos de índices de vegetación.

Para la extracción de los datos se requiere utilizar la herramienta **Pin manager** la cual permite colocar y posicionar los pines en las zonas de estudio los cuales serán los pixeles que abarquen los campos de interés y para complementar esta acción se utilizara la herramienta **Filter pixel data to be displayed in table** la cual agregara una columna extra mostrando el valor de NDWI en cada pixel, de esta manera se evitó agregar información a la de los campos de cultivo relacionada a la zona urbana u otros tipos de vegetación. Los valores obtenidos corresponderán a los campos agrícolas que se están monitoreando, estos valores se acomodaran en hojas de cálculo para obtener el promedio por día de estas zonas, se realizara este proceso para las dos resoluciones que corresponden a este índice.

4.2. Análisis de las imágenes satelitales de los índices espectrales con información In Situ.

Una vez obtenidos los promedios por día de NDWI se utilizara el método de regresión lineal en hojas de cálculo para obtener una ecuación lineal, esto se realizara utilizando valores In Situ que representan la cantidad de biomasa (Kg/m^2) y los promedios de NDWI, por lo que se debe de obtener dos ecuaciones para cada campo que se esté monitoreando con la intensión de que la ecuación obtenida logre predecir el comportamiento de los cultivos en los siguientes años.

4.3. Estimación del NDWI.

Para la verificación del índice se requieren los valores de NDWI de cualquier otro año posterior por lo que se tendrá que realizar nuevamente la metodología para este paso y con la única diferencia que no serán necesarios los valores In Situ, el valor de NDWI se sustituirá en la ecuación. Para este trabajo se utilizaron datos de NDWI del año 2020.

5. RESULTADOS.

Para el análisis de resultados para este trabajo se utilizaron las ecuaciones 3 (Diferencia Cuadrática Media), 4 (Sesgo) y 5 (Diferencia Cuadrática Media No Sesgada), Estas ecuaciones permiten estimar la diferencia total de las estimaciones al compararla con los valores observados in situ de contenido de humedad de vegetación (Bazzi et al., 2019).

$$\boldsymbol{DCM = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{Sesgo = \frac{1}{n}\sum(O_i - P_i)} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{DCMNS = \sqrt{RMSD^2 - Bias^2}} \quad (5)$$

Se analizo la diferencia para los cinco sitios de la Tabla 1, estimando el VWC (Contenido de agua de vegetación) con el índice espectral NDWI a dos escalas diferentes (10 y 20 m) y compararlo con el valor obtenido en campañas de medición. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis de las diferencias entre los Datos estimados y observados de contenido en la vegetación.

	DCM (kg/m^2)		Sesgo (kg/m^2)		DCMNS (kg/m^2)	
Sitio	**NDWI-20**	**NDWI-10**	**NDWI-20**	**NDWI-10**	**NDWI-20**	**NDWI-10**
Álvaro	3.73	3.80	-3.70	-3.77	0.508	0.410
Alfredo	0.543	0.548	-.336	-0.265	0.427	0.479
Macario	2.54	2.48	2.49	2.41	0.487	0.574
Palafox-1	2.27	2.55	-2.11	-2.42	0.817	0.799
Palafox-2	2.50	1.99	2.47	1.93	0.408	0.450

Los datos obtenidos muestran el error que existe en las estimaciones de humedad de vegetación en campos agrícolas en la región de Huamantla en el año 2020. La Ecuación 3 muestra el error total que se encuentra en la estimación del VWC con el índice NDWI a diferentes escalas, este error está conformado por los componentes constante y aleatoria.
Se encontró que para el NDWI-10m los sitios con mayor error son Macario y Palafox-1 mostrando diferencias superiores a los $0.500 kg/m^2$. Por el otro lado, el NDWI-20m mostro diferencias superiores a los $0.500 kg/m^2$ para los sitios Álvaro y Palafox-1. De manera general, se observa que el error máximo en las estimaciones es de $0.817\ kg/m^2$ y la diferencia mínima fue de $0.408\ kg/m^2$. Es importante destacar que la diferencia máxima se encuentra en la resolución de 20m, la cual se atribuye a la heterogeneidad de las observaciones al ampliar la resolución espacial.

ISSN: 2992-8338

Finalmente, se puede establecer una buena aproximación entre observaciones y estimaciones para el monitoreo de campos de Huamantla debido a que se observa de 1kg/m^2 por parte de la componente aleatoria del error.

6. CONCLUSIONES.

En este trabajo se propone la estimación de VWC utilizando imágenes Sentinel-2B e índices espectrales (NDWI) a resolución de 10 y 20 m sobre campos de maíz de temporal de la región de Huamantla, Tlaxcala. La metodología empleada para este trabajo muestra ser concreta al mostrar una diferencia máxima de 1kg/m^2 por parte de la componente aleatoria del error.

El trabajo muestra una propuesta que permite el monitoreo de regiones amplia de manera temporal, pero resalta la importancia de calibrar este proceso para diferentes tipos de cultivo o diferentes regiones con la finalidad de caracterizar el error de las estimaciones de parámetros biofísicos con base en información satelital.

REFERENCIAS

Bazzi, H., Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M., & Belhouchette, H. (2019). A comparison of two soil moisture products S 2 MP and copernicus-SSM over southern France. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *12*(9), 3366-3375.

Gao, Y., Walker, J. P., Allahmoradi, M., Monerris, A., Ryu, D., & Jackson, T. J. (2015). Optical sensing of vegetation water content: A synthesis study. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(4), 1456-1464.

Gavilán Pino, V. A. (2019). Balance anual de agua en cultivos utilizando datos de serie de tiempo armonizados de Landsat-8 y Sentinel-2.

INEGI, Producto Interno Bruto por Entidad Federativa 2019.

Instituto Geográfico Nacional de España, 2020. El programa Copernicus Para la monitorización del territorio y los Objetivos del Desarrollo Sostenible.

Monsiváis-Huertero, A., Constantino-Recillas, D. E., Hernández-Sánchez, J. C., Huerta-Bátiz, H. E., Judge, J., López-Estrada, P. A., ... & Saúce-Rangel, V. M. (2022). Assessment of NASA SMAP soil moisture products for agricultural regions in Central Mexico: An analysis based on the THEXMEX dataset. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *15*, 3421-3443.

Morell-Monzó, S., Estornell, J., & Sebastiá-Frasquet, M. T. (2022). Clasificación del estado de parcelas de cítricos utilizando datos multitemporales Sentinel-2. In *Teledetección para una Agricultura Sostenible en la era del Big Data, Actas del XIX Congreso de la Asociación Española de Teledetección* (pp. 35-38).

Sonobe, R., Yamaya, Y., Tani, H., Wang, X., Kobayashi, N., & Mochizuki, K. I. (2018). Crop classification from Sentinel-2-derived vegetation indices using ensemble learning. Journal of Applied Remote Sensing, 12(2), 026019-026019.

Vargas, G. A., Garay, A. V. A., Hernández, M. S., & Trejo, G. M. (2022). La producción de maíz en Huamantla, Tlaxcala. Textual, (80), 157-180.

Villatoro, B. (2019). Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar. *Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra*, *2020*, 225-243.

ISSN: 2992-8338

Embedded System and Mobile Application for Monitoring Water Level and Quality in Housing Units

Luis Felipe Bustos Hernández, Antonio Isaías Martínez Santos**, Diego Fernández Maldonado**, Jonathan Villanueva Tavira*, Juan Gabriel González Serna*.**

**Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.*
jonathan.vt@cenidet.tecnm.edu.mx , gabriel@cenidet.edu.mx

***Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos,*
20203mc058@utez.edu.mx, 20213mc034@utez.edu.mx , 20203mc069@utez.edu.mx

Abstract: In this paper reviews the use of Embedded Systems and Internet of Things (IoT) device for monitoring the quantity and quality of water and with this project conserve and controlled the precious resources in habitational zones. The real time monitoring process involves sensors, communications, mobile applications and internet.
.Keywords: Internet of Things, Embedded System, Mobile Application.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, nuestra sociedad se encuentra inmersa en una gran cantidad de problemas sociales, económicos, institucionales y ambientales. Problemas como el calentamiento global, la extinción de las especies, la sobrepoblación, la pobreza y la sequía por mencionar algunos, han hecho a la sociedad implantar diversas propuestas y soluciones para contribuir con el medio ambiente. En particular, la administración y la contaminación del agua es una de las principales amenazas en la actualidad, ya que esta puede causar diversas enfermedades en los seres humanos y animales (Varsha Lakshmikantha, 2021). Sin embargo, una situación que se presenta para poder administrar mejor la cantidad de agua en los hogares, es que los tinacos principalmente se encuentran ubicados en lugares poco visibles y accesibles. Es así, como surge la idea de implementar este proyecto con la finalidad de administrar de una mejor forma el vital líquido. El dispositivo y su aplicación móvil hacen uso de dos disciplinas como: la Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT), que son herramientas de gran futuro en muchos sectores, incluido el del agua. Las pruebas y resultados se realizaron en hogares de Cuernavaca, Morelos, México, ciudad que en los últimos años ha sufrido por su escasez de agua. Finalmente, como resultado se obtiene un dispositivo y una aplicación móvil que permite administrar de una mejor forma el líquido en los hogares, así como analizar la calidad de la misma.

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua establece que a nivel mundial el uso del agua se ha incrementado aproximadamente en un 1% al año durante los últimos 40 años y se pronostica que, a causa del crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico, los cambios en los patrones de consumo, este seguirá creciendo a un ritmo parecido de aquí a 2050.

El incremento en el consumo, se concentra en particular en los países de las economías emergentes. (Connor Richard, 2023). La escasez hídrica se está haciendo habitual a consecuencia del impacto local del estrés hídrico físico, sumado a la aceleración y contaminación del agua dulce. Una media del 10% de la población mundial vive en países con un nivel alto o crítico de estrés hídrico. El agua es fundamental para el desarrollo socioeconómico y tiene un papel en prácticamente todos los objetivos del desarrollo sostenible. El agua potable y su saneamiento son de vital importancia para tener una sociedad sana y productiva. Los ecosistemas saludables y la biodiversidad dependen de este vital recurso. Adicionalmente, el agua es necesaria para la producción de alimentos y energía, así como para la mayor parte de las actividades industriales; por lo tanto, la falta de acceso a ella significa un crecimiento económico más lento (Alaa El Din Mahmoud, 2023).

Por lo anterior, en los últimos años se ha producido un auge en las técnicas basadas en inteligencia artificial, identificando de esta forma cuatro categorías de aplicación como: modelado, predicción, pronóstico, apoyo en la toma de decisiones, gestión operativa y optimización (Doorn, 2020). Existen múltiples iniciativas relacionadas con las áreas de Inteligencia Artificial e Internet de las Cosas aplicadas al sector del agua. Con esta clasificación se busca delimitar y concretar cuáles de dichas prácticas son las más relevantes para desarrollar en los siguientes años. Es notable destacar que estas se encuentran en fase de investigación, piloto o ya de explotación comercial (Ver Figura 1) (Fundación Canal de Isabel II, 2020).

ISSN: 2992-8338

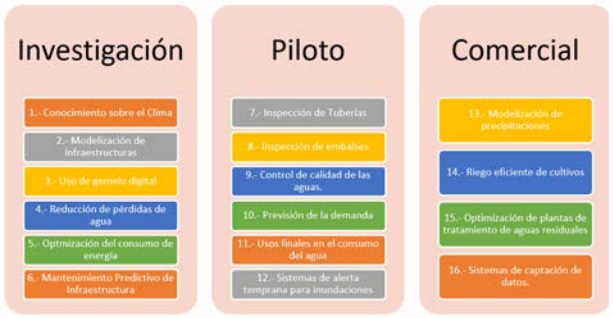


Figura 1. Iniciativas de Internet de las Cosas e Inteligencia Artificial para el Agua.

Actualmente, un gran número de casas habitación en México sufre de falta de agua o constantes cortes del servicio, lo cual provoca que los habitantes adquieran tinacos, cisternas y bombas de agua. De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la CDMX 82% de las viviendas posee un tinaco, lo que indica que hay casi 2 millones 600 mil, por lo que 1.1 de cada 10 tinacos en el país se encuentran en esta ciudad, además, el 57.9% de las viviendas cuentan con cisterna y el 64% con una bomba para movilizar el líquido ya sea hacia un tinaco o a la vivienda misma. (Lara, 2021).

2. TRABAJOS RELACIONADOS.

En lo que respecta a los trabajos relacionados podemos mencionar el realizado por (Rahmat, 2020) que se titula "Water Monitoring System Embedded with Internet of Things (IoT) Devices: A Review donde se realiza un sistema de monitoreo para el manejo y conservación del preciado recurso que es el agua. El objetivo de este trabajo es aprovechar el Internet de las Cosas (IoT) para facilitar el trabajo del monitoreo de la cantidad y calidad del agua, proceso que actualmente se realiza de forma manual, lo que la hace una tarea compleja. Los sensores que ocupa este dispositivo para medir la calidad del agua son: Potencial de Hidrógeno (pH), Conductividad, Temperatura, Turbidez y sensor de potencial de Redox. Finalmente, esta información proveniente del agua es almacenada en la nube para observar tendencias y ubicar posibles fallas si estas existieran en el sistema de agua (Ver Figura 2).

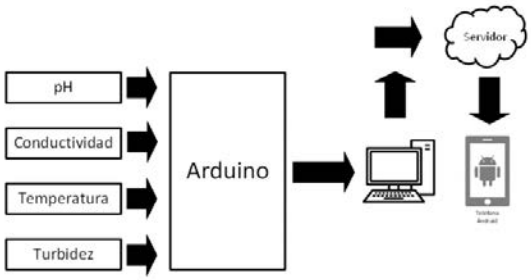


Figura 2. Diagrama a Bloques de operación del trabajo realizado por (Rahmat, 2020).

Una limitación que tiene este trabajo es que no permite obtener la cantidad de litros de agua que guardan los tanques. Adicionalmente, no se reportan tampoco resultados de su aplicación en campo.

b) En lo que concerniente al trabajo realizado por (Lakshmikantha, 2021), "IoT based Smart Water Quality Monitoring System" se implementó un dispositivo que permite analizar la calidad del agua a partir de un sistema basado en Internet de las Cosas y sensores que permite analizar el pH, la Turbidez, la Conductividad, Dióxido de Carbono, Humedad y Temperatura. A continuación, se muestra la arquitectura del sistema desarrollado en este artículo (Ver Figura 3).

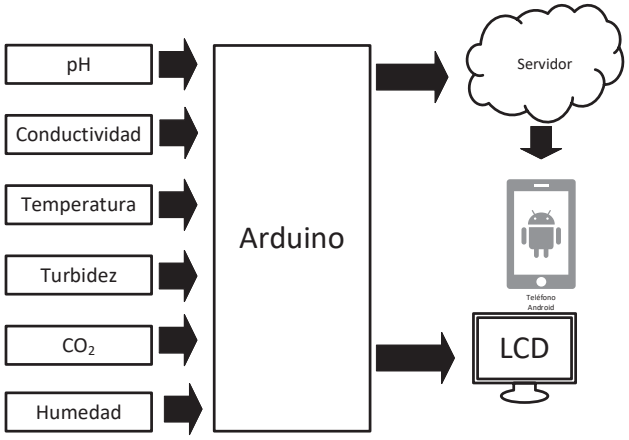


Figura 3. Diagrama a Bloques de operación del trabajo realizado por (Lakshmikantha, 2021).

Sin embargo, tampoco reporta pruebas en campo, por lo que nuestro proyecto buscará contar con una etapa de validación en campo basándonos en algunos aspectos de la revisión de la literatura. No obstante, la idea de nuestro sistema es que sea de uso rudo con la finalidad de proporcionar la información de forma segura y sin que sufra daños la misma.

c) Para concluir con la revisión, el artículo: "Low-Cost Internet-of-Things Water-Quality Monitoring System for Rural Areas", es un Proyecto realizado para el monitoreo de las fuentes en Rumania para detectar contaminantes en el agua que puedan poner en peligro a la población. El sistema está gestionado y controlado desde una aplicación móvil para evaluar la calidad de cinco fuentes que se encuentran en espacios públicos. Las variables que mide son: temperatura, Potencial de Hidrógeno (pH), Turbiedad y el total de sólidos disueltos. Este proyecto fue realizado por: (Razvan Bogdan, 2023). Los resultados muestran que este proyecto se puede expandir hacia otras zonas rurales que requieran el monitoreo de agua. En trabajos futuros se tiene previsto ampliar el número de sensores, así como una posible vinculación con los ayuntamientos de Rumania (Ver Figura 4).

ISSN: 2992-8338

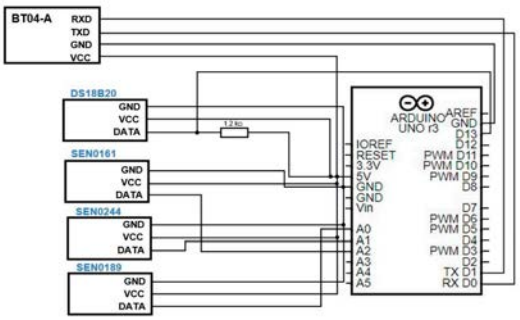


Figura 4. Arquitectura del dispositivo (Razvan Bogdan, 2023)

3. JUSTIFICACIÓN.

El objetivo general de este proyecto es diseñar e implementar un dispositivo con su aplicación móvil para el monitoreo del nivel y la calidad del agua en zonas habitacionales. Adicionalmente, para de estos objetivos se desprenden los siguientes objetivos específicos: administrar el consumo de agua en el hogar; reducir el consumo de agua en el hogar; monitorear la cantidad y calidad del agua que se almacena en los tinacos y cisternas; evitar accidentes por monitorear el nivel que guardan los tanques, tinacos o cisternas donde se almacena el agua y diseñar un dispositivo de bajo costo y uso rudo.

Actualmente, un gran número de casas habitación en México sufre de falta de agua o constantes cortes del servicio, lo cual provoca que los habitantes adquieran tinacos, cisternas y bombas de agua. De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la CDMX 82% de las viviendas posee un tinaco, lo que indica que hay casi 2 millones 600 mil, por lo que 1.1 de cada 10 tinacos en el país se encuentran en esta ciudad, además, el 57.9% de las viviendas cuentan con cisterna y el 64% con una bomba para movilizar el líquido ya sea hacia un tinaco o a la vivienda misma. (Ver Figura 5)

Figura 5. Localización de los tinacos o recipientes en zonas habitacionales en México.

Es por lo anteriormente esbozado que se propone la realización de este proyecto con la finalidad de administrar mejor el vital líquido en los hogares del estado de Morelos, México.

3. METODOLOGÍA

En esta sección, se realiza la descripción del dispositivo diseñado e implementado que consta de sensores de temperatura, pH, turbidez y humedad y nivel. La figura 3 muestra el diagrama a bloques general de nuestro dispositivo de monitoreo de la cantidad y calidad del agua (Ver Figura 6).

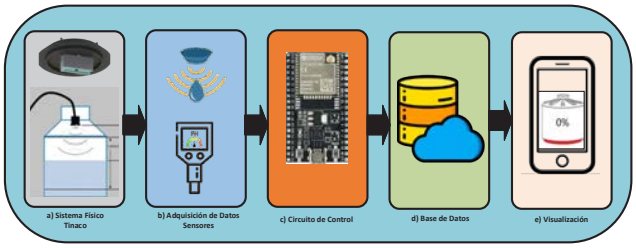


Figura 6. Etapas de funcionamiento del dispositivo.

a) Sistema Físico. - El dispositivo se coloca en el interior del tinaco para poder estar monitoreando la cantidad de agua y la calidad del agua. El controlador central se encuentra resguardado por una estructura diseñada para proteger todos los circuitos electrónicos del agua. Adicionalmente, es importante mencionar que este se diseñó con la finalidad de adherirse de una forma fácil a la tapa del tinaco, todo el diseño fue realizado en un software de diseño asistido por computadora (Ver Figura 7).

Figura 7. Estructura del dispositivo realizado en un programa de diseño asistido por computadora.

b) Sensores. - En esta etapa se encuentran los sensores para poder medir las distintas variables físicas como: nivel, temperatura, humedad, pH y turbidez.

c) Circuito de Control. - Este circuito es que el realiza la adquisición de los datos provenientes de las variables físicas y procesa esa información convirtiéndola de una señal analógica a digital para su procesamiento. Posteriormente, a su vez son enviadas a la base de datos que se encuentra ubicada en la nube con la finalidad de los que los mismos puedan ser visualizados desde el dispositivo móvil (Ver Figura 8).

ISSN: 2992-8338

Figura 8. Circuito Electrónico realizado en mediante la técnica de Printed Circuit Board (PCB).

d) Base de Datos. - Los datos obtenidos son guardados en la base de datos para su análisis y visualización desde dispositivos móviles. Esto es posible gracias a la aplicación desarrollada empleando la base de datos Firebase.

e) Visualización. - Finalmente, para poder visualizar las variables del agua, así como el nivel de nuestro tinaco, es posible mediante una aplicación móvil desarrollada para monitorear los valores almacenados en la base de datos. (Ver Figura 9).

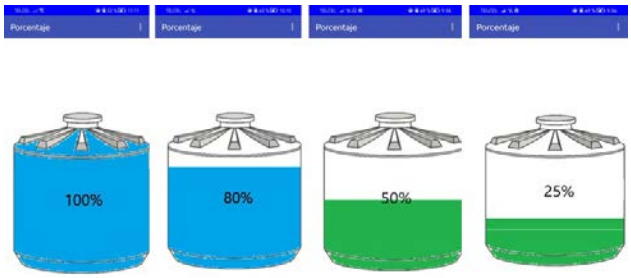


Figura 9. Circuito Electrónico realizado en mediante la técnica de Printed Circuit Board (PCB).

Para concluir, en la siguiente sección se detallan los resultados obtenidos en la aplicación del dispositivo finalizado y puesto en marcha.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS.

En esta sección se presentan las pruebas y los resultados obtenidos de la instalación del dispositivo en pruebas de campo. Para las pruebas se seleccionaron 3 casas habitación de Cuernavaca, Morelos debido a que es actualmente considerado un municipio con problemas de escasez de agua. En las Tablas 1-3 se observan los resultados de las mediciones realizadas para un recipiente desde las 9 de la mañana hasta las 9 de la noche.

Tabla 1. Lecturas de la Cantidad y Calidad del agua.

Nivel	pH	pH Tipo	Turbiedad NTU	Temperatura °C
450	7.5	Alcalino	1	20
420	7.5	Alcalino	1	20
400	7.5	Alcalino	1	20
400	7.5	Alcalino	2	20
390	7.5	Alcalino	2	20
360	7.4	Alcalino	2	20
350	7.4	Alcalino	2	20
340	7.4	Alcalino	2	30
340	7.4	Alcalino	2	30
340	7.3	Alcalino	2	30
340	7.3	Alcalino	2	31
340	7.3	Alcalino	2	31
330	8.4	Alcalino	2	31

Tabla 2. Lecturas de la Cantidad y Calidad del agua.

Nivel	pH	pH Tipo	Turbiedad NTU	Temperatura °C
500	7.4	Alcalino	1	30
500	7.4	Alcalino	1	30
450	7.4	Alcalino	1	30
400	7.5	Alcalino	1	30
390	7.5	Alcalino	1	21
370	7.5	Alcalino	3	21
360	7.5	Alcalino	3	21
360	7.5	Alcalino	3	21
340	7.4	Alcalino	3	19
340	7.4	Alcalino	2	19
340	7.4	Alcalino	2	17
340	7.4	Alcalino	2	17
330	8	Alcalino	2	17

Tabla 3. Lecturas de la Cantidad y Calidad del agua.

Nivel	pH	pH Tipo	Turbiedad NTU	Temperatura °C
350	7	Neutro	2	29
350	7	Neutro	2	29
350	7	Neutro	2	29
250	7	Neutro	2	25
230	7	Neutro	2	25
230	6.5	Neutro	2	25
230	6.5	Neutro	4	25
230	6.5	Neutro	4	20
230	6.5	Neutro	4	20
200	7.4	Alcalino	4	16
200	7.3	Alcalino	4	16
200	7.3	Alcalino	4	16
200	7.3	Alcalino	4	16

ISSN: 2992-8338

5. CONCLUSIONES.

En lo que respecta al funcionamiento para medir el nivel del agua, se constató que el nivel que contienen los recipientes no sufrió mucha variación debido a que constantemente se están llenando, por lo que se observa que están en su mayor parte llenos para utilizar el vital líquido (Ver Figura 10).

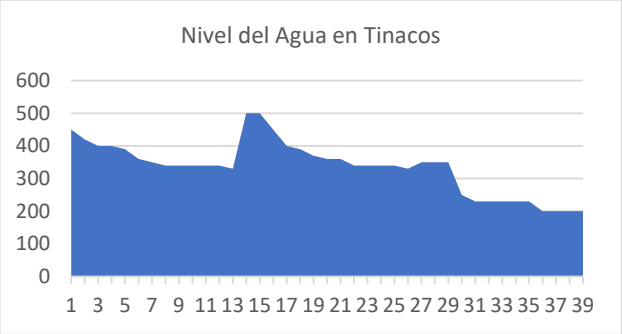


Figura 10. Gráfica del nivel del agua en los tres recipientes.

Con relación a la calidad del agua podemos destacar que en cuanto al pH del agua se mantiene constante casi todo el tiempo y en promedio de 7.3. En lo concerniente con la turbidez el promedio es de 2.25 teniendo algunas variaciones por las tardes. Estos datos deberán de ser analizados por expertos en el tema para poder determinar si existen alguna correlación entre los datos. No obstante, con estas pruebas se comprobó la funcionalidad de nuestro prototipo con pruebas realizadas en campo con la finalidad de validar su funcionamiento y operación en un entorno real. (Ver Figura 11).

Figura 11. Gráfica del pH en los recipientes.

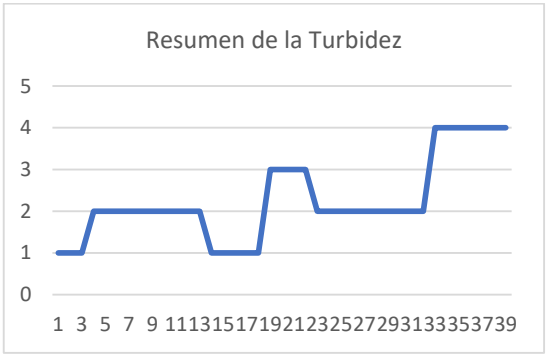


Figura 12. Gráfica de la Turbidez en los recipientes.

REFERENCIAS.

Alaa El Din Mahmoud, M. F. (2023). Artificial Intelligence and Modeling for Water Sustainability. CRC Press.

Connor Richard, M. M. (2023). The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water; executive summary. UNESCO.

Doorn, N. (2020). Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use. Science of the Total Environment.

Fundación Canal Canal de Isabel II. (2020). Cuaderno de Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en el Sector del Agua. Madrid: Canal de Isabel II y Fundación Canal.

Lakshmikantha, V. (2021). IoT Based Smart Water Quality Monitoring System. Global Transactions Proceedings, 181-186.

Lara, D. H. (2021). Diseño e implementación de un sistema embebido para la administración del agua en casas habitación. Revista Tecnología Digital, 115-126.

Rahmat, N. K. (2020). Water Monitoring System Embedded with Internet of Things (IoT) Device: A Review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Razvan Bogdan, C. P.-V. (2023). Low-Cost Internet-of-ThingsWater-Quality Monitoring System. Sensors .

ISSN: 2992-8338

Solar heat for pottery clay drying from Ixtaltepec-Oaxaca

Sergio Vidaña-cano*, José Jassón Flores-Prieto*

**Tecnológico Nacional de México-CENIDET, Morelos, México C.P 62490*
(Tel: 777-349-58-03; e-mail: m22ce036@cenidet.tecnm.mx, jose.fp@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: This paper presents a dimensioning of a solar heating for drying clay pottery for the community of Ixtaltepec-Oaxaca, determining thermal efficiency of the heater and the dryer. The moisture contents, drying time and energy requirement come from a field study in a pottery small factory. The dimensioning was by TRNSYS© simulations, after construction and validation of the simulator. The drying batch, with clay pieces of 152 kg/batch according to the potters' customs, has initial and final moisture contents of 44 and 7% (*w.b.*). During spring, the drying time was 4 days (38 effective hours, 9.5 hr/d). The average ambient temperature and humidity were 28.0 °C y 68.9%. The average energy requirement for air heating was 117.8 MJ/batch (31.0 MJ/d), at 32 °C and 68% relative humidity. The annual energy requirement of the solar collectors was 50.9 GJ/m^2-a (140.0.6 MJ/d) considering (a_0=0.5421, a_1=5.1838 and a_2=0.0011). Thus, the technological solution comprises seven collectors 2.33 m^2, at flow rate of 1.16 kg/s (39747 kg/h). The thermal efficiency of the solar heater and the dryer were 0.4 and 0.2 for the handicrafts clay used in the Ixtaltepec-Oaxaca.

Keywords: *Air Drying heater, solar heating, solar mud drying, solar drying of mud*

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación de artesanías de barro y cerámica son actividades que ha venido dando identidad a México y a varias comunidades en la escala mundial desde hace cientos de años, como es actualmente el caso de la comunidad de Ixtaltepec-Oaxaca Flores-Prieto *et al*., (2014), Aguilar-Castro *et al*., (2012). En la fabricación, previo a la cocción de las artesanías del barro en hornos a altas temperaturas, un proceso importante es el secado Zaccaron *et al*., (2021). El secado de las piezas se considera la etapa más crítica, este se realiza en galeras semiabiertas donde las cambiantes condiciones climáticas provocan considerables incertidumbres en el proceso. Un secado no uniforme provoca agrietamientos en las piezas, por lo que es muy importante garantizar homogeneidad en el secado como Slevin, (2002). La pérdida de calidad se atribuye a micro fracturas en las piezas que limitan su resistencia mecánica, solo después de horneadas se llegan a tener pérdidas del producto de 10-30%. El limitado cuidado en el secado de las piezas causa gradientes de humedad considerables y evaporación súbita al entrar al horno de cocción, lo que conlleva al agrietamiento de las piezas, disminuyendo así la competitividad de los artesanos en el mercado Martines *et al.*, (2013).

Hoy en día, el secado de sólidos es uno de los procesos de mayor consumo de energía en diferentes tipos de industrias, como la de ladrillos de arcilla, tejas y piezas de alfarería Bououd *et al*., (2018), y actualmente los costos energéticos son desconocidos. Oliveira *et al*., (2018) recomienda mejorar la calidad de los productos con un secado eficiente, donde se controle la temperatura, flujos de aire y la humedad. Para esto, los sistemas de calentamiento solares son una alternativa Boughali *et al*., (2009). Sin embargo, los alfareros aún distribuyen sus productos en el suelo pavimentado de galeras o patios. Incluso llegan a quemar neumáticos y madera para secar los productos, lo que muestra métodos poco eficientes que no solo afectan la calidad de los productos, sino también al medio ambiente.

Por su parte, los sistemas de calentamiento solar absorben la radiación solar y la convierten en energía térmica que calientan el aire del ambiente. El aire caliente se inyecta a una cámara de secado, logrando temperaturas estables de 30-60 °C, y con tiempos de 4-6 horas diarias efectivas al día Zoukit *et al*., (2019). Las limitadas alternativas energéticas en el secado de artesanías de barro recién moldeadas es una de las principales barreras en el desarrollo de la competitividad de los productores de la comunidad de Ixtaltepec-Oaxaca. Así, en este trabajo se presenta el dimensionamiento de un sistema de calentamiento solar para el secado de artesanías de barro para la comunidad de Ixtaltepec-Oaxaca, donde se determina la eficiencia del calentador solar de aire y del secador.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Características y muestras del lugar de estudio

Ixtaltepec se ubica al sureste del Estado de Oaxaca (16.34° N y 95°.01° O, a 41 m.s.n.m), formando parte del Istmo de Tehuantepec, el clima predominante es el tropical húmedo (*A.w.*). La irradiación promedio anual es de 6571.2 MJ/m^2-a (18 MJ/m^2-d), siguiendo un año meteorológico típico Meteonorm v8, (2022). Las muestras de barro son de alfarería local, donde las piezas se elaboran a mano. Las muestras corresponden a la usanza de los alfareros, donde el barro se obtiene de Chihuitan-Oaxaca, un municipio cercano. El barro

ISSN: 2992-8338

se dispone en polvo cribado, y se mezcla con agua hasta tener una consistencia elástica moldeable que pueda mantener su forma. Durante las pruebas de secado en Ixtaltepec, el peso de la muestra en un área estándar de secado se determinó de 152.75 kg/lote. La temperatura ambiente, y la humedad relativa promedio fueron de 28.0 °C y 68.9%. La **Figura 1** muestra piezas durante el secado en galera en los talleres de alfarería actuales.

Figura 1. *Piezas durante el secado en galera.*

2.2 Estrategia de dimensionamiento del secador solar

Como se muestra en la **Figura 2**, la estrategia de diseño del calentador solar implica: a) Establecer requerimientos del secado de las muestras de barro y la evaluación del recurso solar en la comunidad, b) Determinar historia de temperatura experimental a la salida del calentador del sistema propuesto, c) Construcción de simulador basado en TRNSYS© validado con datos experimentales y d) Simular el caso de estudio verificando el cumplimento de las cargas térmicas.

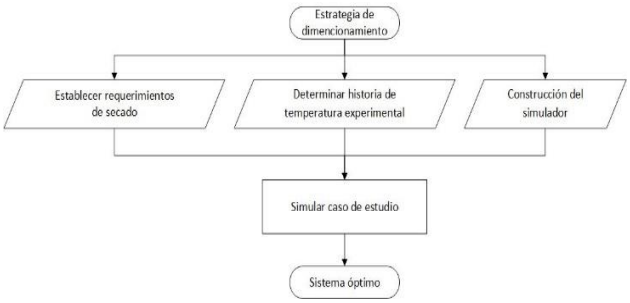


Figura 2. *Estrategia de dimensionamiento del secador solar.*

a) Requerimientos del secado de barro

Energía requerida

La irradiancia *G* a medida que aumenta la temperatura permite una evaporación más rápida Q_{req} del contenido de agua para cada peso de las muestras de barro. La Q_{req} está dada por la **Ecuación 1**.

$$Q_{req} = h_{fg} \int_{t_i}^{t_f} M_w \, dt \qquad (1)$$

h_{fg} es el calor latente de vaporización del agua (2260 kJ/kg, a 30.3 °C, una atmosfera) y M_w es el peso de la masa del agua a evaporar por producto seco. El tiempo *t*, M_w, y otras condiciones meteorológicas se monitorean en pasos de 10 minutos durante la campaña experimental.

Cinética del barro

El tamaño del lote de las piezas de barro se determina según usos y costumbres de un taller de alfarería de Ixtaltepec-Oaxaca. A través de gravimetría, la cinética de secado se calcula identificando la cantidad de agua removida de las muestras a lo largo del proceso.

La relación de humedad *MR(t)* se determina con la **Ecuación 2**, empleando los datos registrados durante la campaña experimental. La humedad final M_e en todos los experimentos se consideró cuando la humedad ya no cambiaba en el tiempo de acuerdo a (Santos et al., 2020), (Erbay & Icier, 2010).

$$MR(t) = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_0 - M_e} \qquad (2)$$

Donde *M(t)* es el contenido de humedad a lo largo del tiempo de cada muestra en base húmeda (*b.h.*) y se evalúa con la **Ecuación 3**. M_0 es el contenido de humedad inicial (*b.h.*) y M_e es el contenido de humedad en equilibrio (*b.h.*). Como se comentó anteriormente, M_e es poco considerable debido a las fluctuaciones en la temperatura del aire y la humedad relativa Vasconcellos Araújo *et al*., (2019). Así, la ecuación de relación de humedad es $M(t)/M_0$. La evaluación de *M(t)* sigue la **Ecuación 3**. de acuerdo con Mauer *et al*., (2017), donde W_i es el peso inicial de la muestra en gramos, y W_d es el peso de la masa seca en M_0. El peso de la masa seca se determina experimentalmente con una balanza analítica. La evaluación del tiempo de secado se realiza gráficamente, cuando el contenido de humedad alcanza los valores mínimos sin mayores cambios.

$$M(t) = \frac{W_{(t)} - W_d}{W_i} * 100 \qquad (3)$$

b) Temperatura a la salida de los colectores

El sistema experimental de referencia para validación del simulador se ubica en el Parque Científico y Tecnológico de Xochitepec-Morelos. El campo propuesto de calentadores solares de aire se compone de siete calentadores de placa plana dispuestos en serie. El área de cada colector es de 2.33 m^2, con un área total de 37.2 m^2. El aire circula por el sistema de calentamiento solar impulsado con un ventilador de 2.23 kW, con un control empleando variación de frecuencia. El sistema de calentamiento directo de aire absorbe la irradiancia solar mediante los colectores solares a razón de $Q_{s,ar}$. La energía útil proporcionada por los colectores solares de aire se denomina Q_{ua}. La Q_{ua} calienta el flujo de aire de secado que ingresa a la cámara de secado, como se muestra en la **Figura 3 y 4**. Las especificaciones de los colectores se muestran en la **Tabla 1**.

ISSN: 2992-8338

Figura 3. *Componentes del sistema de calentamiento solar de aire.*

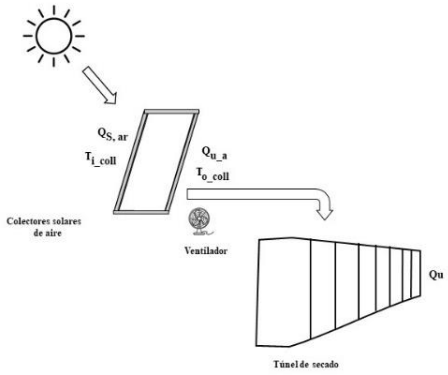


Figura 4. *Sistema de calentamiento solar de aire.*

Tabla 1. *Especificaciones del calentador solar de aire.*

Dimensiones del sistema		
Área de colector	*2.326*	m^2
Fluido de trabajo	*Aire*	*(-)*
Calor específico Cp	*1.012*	kJ/kg K
Flujo de prueba	*236*	kg/h
Curva de eficiencia-ASHRAE 93:2010		
a_0	*0.5421*	*(-)*
a_1	*5.1838*	W/m^2 K
a_2	*0.0011*	W/m^2 K^2

c) Construcción del simulador en TRNSYS©

La validación de la plataforma se realiza comparando la temperatura simulada de salida de los colectores de aire con sus respectivos datos experimentales reportados por Álvarez-Sánchez *et al*., (2021). Para determinar la temperatura que entrega el sistema, los parámetros de entrada son los coeficientes de la curva de eficiencia de los colectores solares de aire a_0, a_1, a_2 y el área de captación *Ac*. Los resultados de las salidas de la simulación del campo de calentamiento de aire T_{o_coll} se calcula con la **Ecuación 4**.

$$T_{o_coll} = T_{i_coll} + \left\{\left[a_0 - a_1\left(\frac{T_{i_coll}-T_a}{G}\right) - a_2\left(\frac{(T_{i_coll}-T_a)^2}{G}\right)\right] A_c G\right\} \quad (4)$$

La energía útil de los colectores solares de aire Q_{ua} se determina con la **Ecuación 5**.

$$Q_{ua} = \int_{t_i}^{t_f}\left(a_0 - a_1\frac{(T_{p_ar}-T_a)}{G} - a_2\left(\frac{(T_{p_ar}-T_a)^2}{G}\right)\right)Q_{s.ar}\, dt \quad (5)$$

donde $T_{p_ar} = (T_{o_coll} + T_{i_coll})/2$

$Q_{s,ar}$ es la radiación solar incidente en los colectores de aire y se determina con la **Ecuación 6**.

$$Q_{s,ar} = A_{ar}\int_{t_i}^{t_f} G\, dt \quad (6)$$

El caudal del aire en el calentador $\dot{m}$, la eficiencia del calentador η_c y la eficiencia del secador η_s se determinan con las **Ecuaciones 7-9**, donde Q_u considera la capacidad energética del calentador.

$$Q_u = \dot{m}C_p\Delta T \quad (7)$$

$$\eta_c = \frac{Q_{u_d}}{I_d} \quad (8)$$

$$\eta_s = \frac{Q_{req}}{Q_{u_d} * dias\ de\ secado} \quad (9)$$

d) Integración del simulador

La energía útil Q_u, la eficiencia del calentador η_c y la eficiencia del secador η_s se determinaron con simulación dinámica por componentes, utilizando TRNSYS©. La energía útil de los colectores solares de aire se simuló con la **Ecuación 5** considerando los parámetros físicos de la **Tabla 1**.

Como se muestra en la **Figura 5**, el **Type1c** simula los colectores solares de aire, el **Type112a** el difusor mecánico, el **Type14h** el control del funcionamiento de los colectores solares de aire. El **Type9a** y **Type109** son para manejar los datos meteorológicos del lugar de estudio en formato TMY. El **Type24** es una función para integrar la energía útil en periodos. El **Type25c** permite almacenar los resultados en un archivo de datos de formato "*xls*".

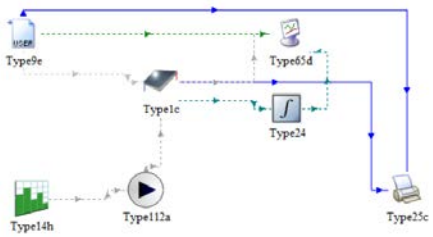


Figura 5. *Plataforma de simulación.*

La precisión de la comparativa de las temperaturas se identifica con el error absoluto siguiendo la **Ecuación 10**.

$$\varepsilon_{abs} = |V_{exp} - V_{sim}| \quad (10)$$

3. RESULTADOS

Los requerimientos de secado de las piezas de barro, la validación de la plataforma de simulación en el intervalo de

ISSN: 2992-8338

trabajo, la propuesta tecnológica con la evaluación y su eficiencia térmica se presentan en esta sección.

3.1. Requerimientos de secado

De acuerdo con la campaña experimental, la **Figura 6** muestra la cinética de secado de las piezas al inicio y al termino fue de 44-37 y 9-5% (*b.h.*), los tiempos de secado de 38 h y la energía requerida por lote (152.7 kg/lote). El contenido de agua retirado en promedio fue del 34.19% y los tiempos de secado totales de 80 h (considerando días completos). La masa de agua retirada fue de 52.23 kg/lote. La **Tabla 2** sintetiza los requerimientos de secado donde se resalta que la energía requerida promedio por cada lote (91.2 lotes por año) es de 117.87 MJ/lote.

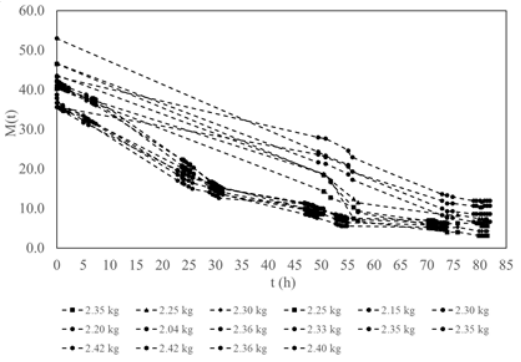


***Figura 6**. Contenido de humedad vs tiempo.*

***Tabla 2**. Requerimientos del secado de barro.*

Características físicas	Piezas	65	pza
	Peso x cada pza	2.35	kg/pza
	Peso x lote	**152.75**	**kg/lote**
	Área de secado	4.48	m^2
	% de agua a remover	0.34	%
	kg de agua a remover x lote	**52.23**	**kg/lote**
Demanda energética	Energía solar (Q_s)	81.26	MJ
	Energía requerida (Q_{req})	**117.87**	**MJ/lote**
	Energía específica (Q_{esp})	0.53	MJ/kg
	Eficiencia secado	0.69	
	Tiempo efectivo	38	h
	Horas_trabajo_dia	9.9	h
	Dias de secado	3.84	dias

3.1 Simulador

El simulador del calentador solar se construyó en TRNSYS© y se validó comparando datos de salida de las temperaturas del calentador solar. El comparativo se realizó con datos experimentales T_{o_exp} y la temperatura de salida simulada T_{o_sim}, obtenidos de la 13:00 a 16:00 p.m. del 13 de julio del 2020, de acuerdo con Álvarez-Sánchez *et al.*, (2021). La **Figura 7** muestra que la historia de la T_{o_exp} estuvo en el intervalo de 46.7-58.7 °C de acuerdo con los datos experimentales, mientras que T_{o_sim} estuvo en 42.7-49.1 °C; con lo que se observó una diferencia máxima de 3.0 °C, con un promedio de 2.2 °C y una desviación estándar del 0.5%. La plataforma permite la optimización de acuerdo a los requerimientos del secado de barro.

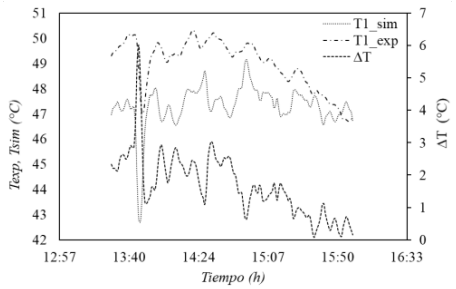


***Figura 7**. Diferencia de temperaturas de salida T_{0_exp} y T_{0_sim} para el dia 13/07/2020 en un horario de 13:00 a 16:00 p.m.*

3.3 Propuesta tecnológica

En la **Tabla 3** se muestra la propuesta tecnológica del calentador considerando la **Sección 2.2** inciso "**d**". La simulación se realizó en un periodo anual con pasos de una hora. El suministro diario de calor fue de 9:00 a.m. a 18:30 p.m., con un tiempo de secado por lote de 38 h. Para esto, la demanda anual de calor resultó de 117.9 MJ/lote, requiriendo un área de captación solar de 16.32 m^2, que se cubre con siete colectores solares de aire con un área de apertura de 2.33 m^2 cada uno. Con lo anterior, la energía útil anual que aporta el calentamiento solar es de 50.9 GJ/m^2-a (140.0 MJ/d). De acuerdo a la **Ecuación 7**, el calentamiento promedio del aire de secado es de 3.5 °C y el caudal del aire de secado es de 39747 kg/h (1.16 kg/s). De acuerdo con las **Ecuaciones 8 y 9,** la eficiencia del calentador solar es de 0.4 y la del secador de 0.2, respectivamente.

***Tabla 3**. Propuesta del calentador en TRNSYS©.*

Propuesta tecnológica				
Dimensionamiento	12	Carga de calentamiento requerida Q_c	29.5	MJ/d
	13	Tiempo de secado total	38	h
	14	Días de secado	4.0	días
	15	Tiempo de secado diário	9.5	h
	16	Eficiencia_propuesta calentador η_{pc}	0.4	%
	17	Aporte del calentador solar	7.2	MJ/m^2-d
	18	Área de colectores A_c	16.4	m^2
	19	Número de colectores N_c	7	
	20	Capacidad requerida del calentador Q_{req_c}	117.9	MJ/d
Verificación de propuesta del calentador solar (utilizando TRNSYS)				
Análisis paramétrico	21	Irradiancia diaria (Recurso solar en la horizontal) Id	295	MJ/d
	22	Capacidad energética del calentador x día Q_{u_d}	140	MJ/d
	23	Capacidad energética del calentador x lote Q_{u_lt}	558	MJ/lote
	24	Capacidad del calentador Q_{ua}	50946	MJ
	25	Temperatura promedio de salida del calentador	31.5	°C
	26	Temperatura promedio ambiente T_a	28.0	°C
	27	Diferencia promedio de temperaturas ΔT	3.5	°C
	28	Caudal de aire en el calentador $\dot{m}$	39747	kg/d
			1.16	kg/s
	29	Eficiencia del calentador η_c	0.47	
	30	Eficiencia del secador η_s	0.21	

De acuerdo a las condiciones climáticas de un año meteorológico típico, la irradiación mínima, máxima y promedio mensual fue de 3899.16-7161.1 kJ/m^2-a y 5777.7 kJ/m^2-a. Con lo anterior, la solución tecnológica permite el aporte de calentamiento de 7.2 MJ/m^2-d, con un calentamiento promedio diario del aire de secado de 3.5 °C, durante 9.5 horas del perfil de trabajo. La **Figura 8** muestra el intervalo de T_{o_coll} (29.5-33.72°C) y T_a (27.0-29.4 °C) para un año típico meteorológico.

ISSN: 2992-8338

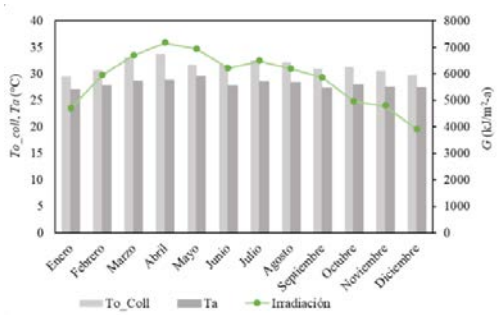


***Figura 8**. T_{o_coll}, T_a e irradiación promedio mensual para un año meteorológico típico.*

6. CONCLUSIONES

Durante una campaña experimental con gravimetría y la cinética se identificaron los contenidos de humedad iniciales y finales de las muestras, los tiempos de secado y la energía requerida para secar un lote de piezas de barro de 152.7 kg/lote. El contenido de humedad identificado inicial es de 44-37, el final de 9-5% (*b.h.*), el contenido de agua promedio a remover de 34.19% y el tiempo de secado promedio fue de 38 horas soleadas efectivas. La cantidad de masa de agua a retirar por lote de piezas de barro es de 52.23 kg.

La propuesta tecnológica del calentador solar se dimensionó con un programa en TRNSYS©. La validación del programa mostró una diferencia máxima de 3.5 °C, y en promedio fue de 2.2 °C con una desviación estándar de la temperatura simulada de 0.5%. De acuerdo con lo simulado, la energía requerida para el secado de barro es de 117.9 MJ/lote. La energía útil anual que aporta el calentador de aire es de 51.0 GJ/m^2-a (140.0 MJ/d). Considerando la energía que aporta el sistema, el caudal del aire de secado resultó de 39747 kg/h (1.16 kg/s). La eficiencia del calentador solar fue de 0.4 y la del secador de 0.2.

La evaluación anual del sistema de calentamiento solar de aire permitió determinar el rendimiento térmico y las temperaturas de secado durante un año en condiciones de secado de acuerdo con la industria respectiva de los talleres de Ixtaltepec y de las condiciones ambientales del lugar. Las condiciones ambientales como la temperatura ambiente, el recurso solar, la humedad relativa ambiente y la velocidad del viento son factores importantes en el dimensionamiento de la solución tecnológica.

NOMENCLATURA

a_0	Constante de la ecuación de eficiencia térmica del colector solar	(-)
a_1	Término lineal de la ecuación de eficiencia térmica del colector solar	W/m^2 k
a_2	Término cuadrático de la ecuación de eficiencia térmica del colector solar	W/m^2 k
A_{sr}	Área de secado de referencia	m^2
Ac	Área de colectores	m^2
b.h.	Contenido de agua en base húmeda	%
$Cp_{_air}$	Calor específico del aire	kJ/ kg
d	Días de secado	
h	Horas	
HR	Humedad relativa	%
I_d	Irradiancia diaria sobre la horizontal	MJ/d
k	Constante de secado	(-)
Kg_{H2O}	Porcentaje de agua a remover	%
$M(t)$	Contenido de humedad	%, b.h.
M_e	Contenido de humedad de equilibrio	%, b.h.
M_o	Contenido de humedad inicial	%, b.h.
$MR(t)$	Índice de humedad	(-)
M_w	Peso de la masa de agua	kg
N_c	Número de colectores	(-)
Pza	Número de piezas	(-)
$Q_{s,ar}$	Radiación solar incidente en los colectores de aire	kJ/h.m^2
Q_c	Carga de calentamiento requerida	MJ/d
Q_{u_d}	Capacidad energética del calentador x día	MJ/d
Q_{req_c}	Capacidad requerida del calentador	MJ/d
Q_{u_lt}	Capacidad energética del calentador x lote	MJ/lote
Q_{req_lt}	Energía requerida por lote	kJ
Q_{esp}	Energía específica	MJ/kg
Q_u	Energía útil	kJ
Q_s	Irradiación anual	MJ/m^2-a
Q_d	Irradiación promedio diaria	MJ/m^2-d
t_i	Tiempo inicial, minutos	h
t_f	Tiempo final, minutos	h
T_{o_coll}	Temperatura promedio de salida del calentador	°C
T_a	Temperatura promedio ambiente	°C
T_a	Temperatura ambiente	°C
W_i	Peso muestra inicial	kg
W_d	Peso masa seca	kg
W_{agua_lt}	Peso de agua a remover x lote	kg/lote
$W_{_pza}$	Peso x pieza	kg
$W_{_lt}$	Peso x lote	kg
$\dot{m}$	Caudal de aire en el calentador	kg/s
ΔT	Diferencia promedio de temperaturas	°C

Letras griegas

η_c	Eficiencia del calentador	%
η_s	Eficiencia del secador	%
ε_{abs}	Error absoluto	%

ISSN: 2992-8338

REFERENCIAS

Aguilar-Castro, K. M., Flores-Prieto, J. J., Baltazar-Lopez, M. E., & Macias-Melo, E. V. (2012). Design and experimental evaluation of a mixed-mode continuous solar dryer for plaster molds. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *26*(9), 2969–2976. https://doi.org/10.1007/s12206-012-0707-x

Álvarez-sánchez, F., Flores-prieto, J., & García-valladares, O. (2021). Annual thermal performance of an industrial hybrid direct– indirect solar air heating system for drying applications in morelos-méxico. *Energies*, *14*(17). https://doi.org/10.3390/en14175417

Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar - Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*, *83*(12), 2223–2232. https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.09.006

Bououd, M., Hachchadi, O., Janusevicius, K., Mechaqrane, A., & Martinaitis, V. (2018). Energy performance of a clay tiles solar drying system. *AIP Conference Proceedings*, *2056*(December). https://doi.org/10.1063/1.5084987

Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *50*(5), 441–464. https://doi.org/10.1080/10408390802437063

Flores-Prieto, J. J., Aguilar-Castro, K. M., Baltazar-López, M. E., Alvarez, G., Castillo-Rincón, R., & Bahena-Bustos, J. C. (2014). Indoor indirect solar dryer for ceramic craft industry. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *28*(1), 349–356. https://doi.org/10.1007/s12206-013-0974-1

Martines-lopez, E., & Lira-cortes, L. (2013). Moisture transfer analysis during drying of brick by temperature and relative humidity profiles. *European Scientific Journal*, *9*(33), 109–122.

Mauer, L. J., & Bradley, R. L. (2017). *Moisture and Total Solids Analysis*. 257–286. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5_15

Oliveira, H. A., Silva, D. C., Oliveira, R. M. P. B., Santos, C. P., de Jesus, E., & Macedo, Z. S. (2018). Estimating isotherm parameters of drying clay for the ceramic industry of Sergipe, Brazil. *Applied Clay Science*, *161*(June 2017), 211–214. https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.013

Santos, R. S., de Farias Neto, S. R., Barbosa de Lima, A. G., Silva Júnior, J. B., & da Silva, A. M. V. (2020). Drying of Ceramic Bricks: Thermal and Mass Analysis via CFD. *Diffusion Foundations*, *25*, 133–153. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/df.25.133

Slevin, R. (2002). *Characterising ceramics during the drying process*. *September*, 17–19.

Vasconcellos Araújo, M., Sousa Santos, R., Moura da Silva, R., Silva do Nascimento, J. B., Gomes dos Santos, W. R., & Barbosa de Lima, A. G. (2019). Drying of industrial hollow ceramic brick: A numerical analysis using CFD. *Defect and Diffusion Forum*, *391*(February), 48–53. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.391.48

Zaccaron, A., de Souza Nandi, V., & Bernardin, A. M. (2021). Fast drying for the manufacturing of clay ceramics using natural clays. *Journal of Building Engineering*, *33*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101877

Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S., & Abdenouri, N. (2019). Design of mamdani type fuzzy controller for a hybrid solar-electric dryer: Case study of clay drying. *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019*, 1332–1337. https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820581

ISSN: 2992-8338

Classification of anuran species based on bio-acoustic signals using the fractional Fourier transform

C.D. Solorzano-Madrigal, [*] **H.M. Cortés-Campos,** [*]
L.F. Avalos-Ruíz, [*] **J.F. Gómez-Aguilar.** [**]

[*] *Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*
[**] *CONAHCyT-Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

Abstract
This work presents a methodology for the classification of anuran species based on bioacoustic signals. Features were obtained using a 5-level wavelet decomposition and fractional Fourier transform. For the classification stage, a neural network was trained, achieving an accuracy of 91.27%. The proposed methodology can be used for non-invasive observation and recording of species in ecosystems.

Keywords: Classification, Neural Networks, Fractional Fourier Transform, Bioacoustics.

1. INTRODUCCIÓN

La conservación de los ecosistemas es de vital importancia para mantener la biodiversidad y el equilibrio ecológico. Estudios recientes, han demostrado cómo el monitoreo bioacústico puede ser esencial en esta tarea, permitiendo la identificación y seguimiento de especies clave, de igual manera se demuestra que la bioacústica desempeña un rol crucial en la conservación de ecosistemas al permitir un monitoreo no invasivo y preciso de la biodiversidad.

La bioacústica es el estudio de los sonidos producidos por los organismos vivos y su papel en la comunicación, el comportamiento y la ecología de las especies Pieretti et al. (2011). La bioacústica se utiliza para comprender y monitorear ecosistemas naturales, un estudio de Ordóñez (2019) evaluó el paisaje acústico en una zona protegida, identificando patrones de actividad que son fundamentales para la conservación, en este estudio se utilizó la bioacústica para identificar doce especies de anuros, incluyendo algunas a nivel de género, esta metodología ofrece una forma efectiva de evaluar y conservar la vida silvestre.

El procesamiento de señales en bioacústica enfrenta desafíos significativos, en particular en la clasificación precisa de especies a partir de las señales acústicas. El desafío principal en bioacústica es la clasificación precisa de especies a partir de señales sonoras. Un estudio reciente de Zhang et al. (2021) logró una alta precisión del 94.5% al utilizar la Transformada de Fourier y una red neuronal convolucional para clasificar aves, este enfoque es esencial para proteger la diversidad de aves.

La bioacústica también enfrenta desafíos como variabilidad estacional, ruido ambiental y similitudes morfológicas entre especies, como se evidenció en la revisión literaria. La bioacústica desempeña un papel clave en la conservación y comprensión de los ecosistemas naturales Xie et al. (2021). Superar estos retos es esencial para aprovechar al máximo la bioacústica en la conservación de ecosistemas y la monitorización de la biodiversidad, si bien las redes neuronales han demostrado ser prometedoras, la mejora continua de los métodos de procesamiento de señales es necesaria para abordar la variabilidad de los datos y aumentar la precisión en la identificación de especies la bioacústica es invaluable en la preservación de la vida silvestre y la conservación de ecosistemas de una manera no invasiva..

El uso de la Transformada de Fourier fraccionaria (FRFT) en señales bioacústicas se ha destacado en varios estudios, ofreciendo una herramienta eficaz para el análisis de análisis de vocalizaciones de ranas, mamíferos y aves. En el estudio de Laje et al. (2018), se utilizó la FRFT para extraer características temporales y espectrales de los cantos de ranas, lo que contribuyó a una mejor comprensión de los procesos de comunicación acústica en estas especies. En la investigación de Sarria Sarria-Paja et al. (2019), se desarrolló una técnica que mejoró la identificación de patrones en murciélagos con mayor resolución en el análisis de tiempo-frecuencia. Beltran Beltran et al. (2020) empleó la FRFT para analizar señales de canto de aves y facilitar la identificación de patrones y clasificación de especies. En el estudio de Li Li et al. (2020), la FRFT se utilizó para calcular MFCC a partir de sonidos de ballenas, logrando una precisión del 94.6%en su clasificación. Por otro lado, Das Das et al. (2019) aplicó la FRFT en señales de

ISSN: 2992-8338

vocalizaciones de anfibios, mejorando la resolución de características temporales y frecuenciales en los cantos, facilitando la discriminación y clasificación precisa de especies. Estos ejemplos resaltan la versatilidad de la FRFT en la comprensión de la comunicación acústica en la naturaleza. La FRFT es esencial para el análisis de señales bioacústicas, permitiendo una representación precisa y mejorando la identificación y clasificación de especies en varios contextos.

En Zaguri et al. (2021) y Niu et al. (2020), se usaron redes neuronales convolucionales para detectar eventos bioacústicos con alta precisión en varios sonidos y contextos. En el estudio de Singh et al. (2021), se propuso una representación tiempo-frecuencia innovadora junto con redes neuronales convolucionales para clasificar vocalizaciones de mamíferos. En el trabajo de Jin et al. (2020), se combinó la representación tiempo-frecuencia de las llamadas de ranas con redes neuronales convolucionales para lograr alta precisión en la clasificación de especies de ranas basada en sus llamadas. Además, en la investigación de Bonada et al. (2018), se aplicaron técnicas de procesamiento de señales y redes neuronales convolucionales para identificar especies de murciélagos a partir de grabaciones de audio con reducción de ruido. Este enfoque mejoró significativamente la precisión en la clasificación de vocalizaciones, destacando el potencial del aprendizaje profundo y las redes neuronales convolucionales en la clasificación precisa de señales bioacústicas y la detección de eventos en aplicaciones de monitoreo de la biodiversidad.

La Transformada de Fourier Fraccionaria (FRFT) ofrece ventajas significativas en el análisis de señales bioacústicas al proporcionar una representación que involucra las características temporales y frecuenciales de los sonidos, lo que facilita la clasificación de especies. Por otro lado, las redes neuronales permiten una clasificación automática precisa de señales bioacústicas al aprender patrones complejos, lo que aumenta la precisión en la identificación de especies en una amplia variedad de contextos. Ambos enfoques son herramientas poderosas para la conservación y el monitoreo de la biodiversidad en el campo de la bioacústica.

2. PRELIMINARES MATEMÁTICOS

En este artículo científico, se abordan conceptos matemáticos clave relacionados con las transformadas integrales y sus aplicaciones en el análisis de señales.

2.1 Transformadas Integrales

Las transformadas integrales son operadores matemáticos que relacionan dos dominios distintos mediante la integración. En la Ecuación (1), se muestra la forma general de una transformada integral.

$$F(u) = \int_{a_1}^{a_2} K(u,t) \cdot f(t)\, dt, \tag{1}$$

donde:

- $f(t)$: representa la función a transformar.
- $K(u,t)$: es el kernel de transformación que define cómo se relacionan los valores en el dominio original con los del dominio transformado.
- a_1, a_2: definen los límites de la integral.

2.2 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta fundamental en el análisis de señales. Permite representar una función en el dominio de la frecuencia y se define de la siguiente manera:

Para una función $f(t)$ en el dominio del tiempo, se tiene

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} f(t)\, dt. \tag{2}$$

Donde $x(t)$ es la señal de entrada y ω es la frecuencia angular, Norton and Karczub (2003).

La ejemplificación más básica de la serie de Fourier es que toda función periódica con un periodo T puede expresarse como una adición trigonométrica de senos y cosenos de periodo T. González (1997) .

2.3 Transformada Fraccionaria de Fourier (FRFT)

La FRFT es una generalización de la transformada de Fourier que permite rotar el ángulo en el plano tiempo-frecuencia. La transformada fraccionaria de Fourier la definió por primera vez Víctor Namias en el año 1980 Namias (1980). A continuación se presenta la FRFT desde el punto de vista del cálculo fraccionario: Transformada fraccionaria de Fourier se define como [4]:

$$f_a(u) = \int_{-\infty}^{\infty} K_a(u,u') f(u') du', \quad donde$$
$$K_a(u,u') = A_\alpha exp[i\pi(\cot\alpha u^2 - 2\csc\alpha uu' + \cot\alpha u'^2)], \tag{3}$$

y

$$A_\alpha = \exp\sqrt{1 - i\cot\alpha},\ \alpha = \frac{a\pi}{2}. \tag{4}$$

Donde $a \neq 2j$, cuando $\alpha = 4j$ la transformación es definida como $K\alpha(u,u') = \delta(u-u')$ y cuando $a = 4j+2$ la transformada se define como $K\alpha(u,u') = \delta\ (u+u')$ se puede demostrar que el kernel para $a \neq 2j$ se acercan estas funciones delta cuando se aproxima el kernel a un números enteros par.

La elección del valor de α afectará cómo se analiza la señal en términos de su contenido espectral y temporal. Está transformada es útil en aplicaciones donde se necesitan representaciones de señales que no se ajustan bien a las propiedades de la transformada de Fourier tradicional La FRFT es de gran importancia en el análisis de señales en tiempo-frecuencia, con diversas aplicaciones en campos como comunicación, cifrado, procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones, Ozaktas and Aytür (1995).

2.4 Transformada wavelet

La transformada wavelet descompone señales en componentes escaladas y desplazadas de una función previamente definida conocida como wavelet madre. La Ecuación (5) presenta de manera general la función wavelet madre con escalamiento a y desplazamiento b

ISSN: 2992-8338

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (5)$$

La Ecuación (6) presenta la transformada wavelet

$$WT(f(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (6)$$

La transformada Wavelet, descompone señales en componentes de tiempo y frecuencia, aportando detalles tanto en el dominio temporal como en el espectral, en contraste con la transformada de Fourier. La selección de la función wavelet madre dependerá de la morfología de la señal a analizar.

La aplicación de la transformada wavelet como filtros para la descopmposicion de una señal se lleva a cabo a través de la definición de la función wavelet madre como:

$$\Phi(t) = \sum_{k=-1}^{N-2} (-1)^k \cdot c_{k+1}\psi(2t+k), \quad (7)$$

en donde c_k corresponde a los coeficientes wavelet, los cuales pueden ser usados como filtros, al odernarse en dos tipos de patrones de forma matricial, en la Fig. 1 se muestra el diagrama de la descomposición wavelet.

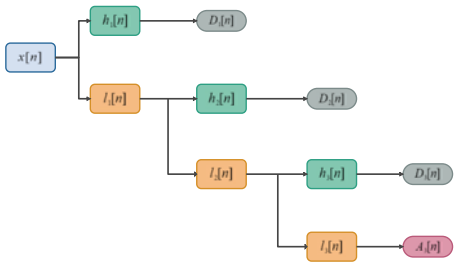


Figure 1. Descomposición wavelet 3 niveles.

2.5 Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA) se basan en modelos simplificados de las redes neuronales biológicas, buscando capturar su capacidad de resolver problemáticas como el reconocimiento de patrones. Una RNA es definida también como un procesador paralelo distribuido e interconectado que almacena conocimiento experimental, Kubat (1999).

La Ecuación (8) representa una capa de una red neuronal, donde X y Y son la entrada y la salida de la capa respectivamente. W representa los pesos sinápticos que ponderan la entrada. θ es el bias de las neuronas y φ la función de activación.

$$Y_i = \varphi\left(W_i X_i + \theta\right). \quad (8)$$

En el contexto de la clasificación automática, las RNA pueden ser empleadas como clasificadores. Un clasificador analiza las características de los datos y predice su etiqueta. Estas herramientas automatizan la categorización basada en patrones, reglas o características específicas, siendo fundamentales en la automatización de procesos y la toma de decisiones basada en datos. Los clasificadores son claves en la organización y comprensión de grandes conjuntos de información.

En este trabajo se consideran RNAs como modelos para la clasificación de señales bioacústicas. Específicamente en los anuros, el canto desempeña un papel crucial en la reproducción y la selección sexual, ya que transmite información sobre las características físicas y la ubicación de las especies. En el estudio de Alberto (2015), monitoreo bioacústico en la reserva de la biosfera Naha en Chiapas, se utilizaron dos grabadoras Song-Meter para registrar el canto de anuros. Las grabaciones se almacenaron en formato .wav y .mp3 con una tasa de muestreo de 48 KHz y 16 bits.

En un total de 370 horas de grabación, se identificaron 12 especies, de las cuales 5 se identificaron solo a nivel de género. Para analizar las grabaciones, se generaron espectrogramas de las especies utilizando el programa Raven Pro 1.4 y se midieron ocho y las características temporales se midieron en la representación gráfica de la onda, mientras que la característica espectral se midió en el espectrograma. Para una inspección más detallada, se utilizó el programa Adobe Audition 3, que permitió observar el espectro de sonido y editar fragmentos de audio. Ochoa-Ochoa, L.M. 2020. Fonoteca de Anfibios de México. Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera", Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias. UNAM.

3. PREPROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Debido a la naturaleza de las señales, estas se encontraban contaminadas con ruido ambiental. Un filtro pasabanda se utiliza para resaltar o aislar una banda específica de frecuencias dentro de una señal y atenuar o eliminar las frecuencias fuera de ese rango, y su comportamiento se puede entender en términos de la densidad espectral de potencia de la señal de entrada y la respuesta en frecuencia del filtro, Oppenheim and Schafer (1999). El filtro pasabanda utilizado fue diseñado con una atenuación de $60dB$ para frecuencias fuera de los rangos especificados en la Tabla 1. Se empleó un filtrado de fase cero con la finalidad de no alterar la fase de las señales procesadas.

Table 1. Rangos de frecuencia de los sonidos de anuros considerados.

Clase	Especie	Rango $[kHz]$
1	Agalychnis callydrias	$1.5 - 2.5$
2	Agalychnis moreleti	$1.0 - 1.4$
3	Anotheca spinosa	$0.5 - 2.5$
4	Craugastor Sp1	$1.0 - 2.1$
5	Craugastor Sp2	$1.0 - 2.1$
6	Craugastor Sp3	$1.0 - 2.1$
7	Craugastor Sp4	$1.0 - 2.1$
8	Craugastor Sp5	$1.0 - 2.1$
9	Dendrosophus ebraccatus	$2.5 - 3.5$
10	Hyalinobathrachium fleishmani	$3.8 - 7.6$
11	Hypopachus variolosus	$0.9 - 1.3$
12	Lithobates brownorum	$1.1 - 2.4$
13	Rhinella horribilis	$0.6 - 5.8$
14	Rhinophirnus dorsalis	$1.1 - 1.9$
15	Tlalocohyla loquax	$0.9 - 1.5$

ISSN: 2992-8338

La Figura 2 presenta la comparación entre una señal tomada de la base de datos previamente mencionada con la misma señal filtrada.

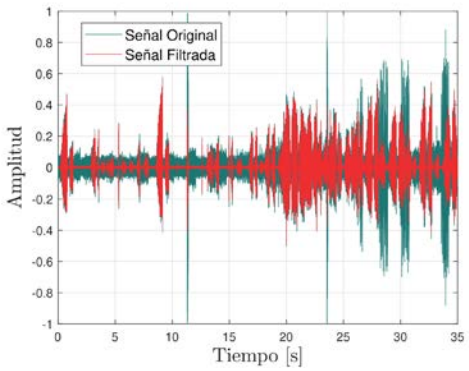


Figure 2. Comparación de una señal con ruido ambiental y su filtrado.

La segmentación de los datos se llevó a cabo por actividad acústica en amplitud mientras que para los anuros que producen un sonido continuo su segmentación se llevó a cabo basado en el tiempo de duración.

Se consideraron funciones wavelet madre de la familia Symlet y Daubechies, las cuales debido a su forma presentan una opción para el análisis de señales de audio.

En la etapa de extracción de características, se empleo una descomposición wavelet de 5 niveles. Se tomaron los dos niveles de descomposición los cuales corresponden a las componentes de alta frecuencia en los niveles 4 y 5. Se aplicó la FRFT a los niveles considerados de manera individual, por lo que se utilizaron dos órdenes de transformación α y β.

4. ENTRENAMIENTO

Se seleccionó como modelo de clasificación una RNA. Las redes neuronales de perceptrón multicapa se componen al menos de tres capas: una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Estas redes se utilizan para problemas de aprendizaje automático, clasificación, regresión entre otros. En el caso específico del aprendizaje automático son populares las siguientes funciones de activación

- Sigmoidal: $Y = V\ \phi\ (WX + W_h)$.
- ReLu: $R(z) = max(0,\ z)$.
- Softmax: $z_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^{K} e^{z_j}}$.

Los parámetros de la red a entrenar se muestran en la Tabla 2, se propone una arquitectura de cinco capas las primeras cuatro capas utilizan la función relu, en la capa final se emplea la función de activación softmax, el numero de neuronas en la capa de salida corresponde al número de clases en la clasificación.

Table 2. Numero de neuronas y funciones de activación utilizadas por capa para la red neuronal entrenada.

Capa	Número de Neuronas	Función de Activación
1	2048	relu
2	1024	relu
3	512	relu
4	256	relu
5	15	softmax

Para el entrenamiento de la red neuronal se empleó el método ADAM (Estimación de Momento Adaptativo) el cual es un método de gradiente estocástico popular utilizado en aplicaciones de aprendizaje automático. De manera general el algoritmo permite actualizar las tazas de aprendizaje de cada parámetro de manera individual. La aleatoriedad involucrada en el algoritmo por el gradiente estocástico evita que el algoritmo se detenga en mínimos locales. Se presenta en el Algoritmo 1 el pseudocodigo del método ADAM

Algoritmo 1 Entrenamiento con método de Adam.

Considerando: $\alpha \in \mathbb{R}^+$, $\epsilon \in \mathbb{R}$. $\beta_1\beta_2 \in (0,1), w_0 \in \mathbb{R}^n$ **y la función** $f(w) \in C^2\ (\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$
$m_0 = 0, v_0 = 0, t = 0$
while w no converge do
  $m_{t+1} = \beta_1 m_t + (1-\beta_1)\nabla_w f(w_t)$
  $v_{t+1} = \beta_2 v_t + (1-\beta_2)\nabla_w f(w_t) \otimes \nabla_w f(w_t)$
  $w_{t+1} = w_t - \alpha \frac{\sqrt{1-\beta_2^{t+1}}}{(1-\beta_1^{t+1})} m_{t+1} \oslash \sqrt{v_{t+1} \oplus \epsilon}$
  $t = t + 1$
end while

Para el entrenamiento del clasificador se empleó el 70% de los datos disponibles, reservando el 30% restante para la etapa de validación. La evaluación de los resultados de entrenamiento y validación fue realizada por medio de diversos índices de desempeño. La ecuación (9) presenta la función de exactitud, en donde VP representa los verdaderos positivos, VN los verdaderos negativos y N el número total de señales empleadas

$$Acc = \frac{VP + VN}{N}. \tag{9}$$

La Ecuación (10) representa la precisión y relaciona los positivos con los falsos positivos, denotados como FP

$$P(M) = \frac{VP}{VP + FP}. \tag{10}$$

Por su parte la exhaustividad relaciona los positivos con los falsos negativos (FN) como se muestra en la ecuación (11)

$$Ex(M) = \frac{VP}{VP + FN}. \tag{11}$$

Para la selección de los órdenes de transformación de la FRFT (α, β) se empleó un algoritmo de optimización metaheurística. El algoritmo PSO (Optimización por Enjambre de Partículas) es una técnica que utiliza partículas virtuales para encontrar soluciones óptimas en problemas de optimización. Estas partículas se mueven en un espacio

ISSN: 2992-8338

multidimensional definido en el espacio de la solución y ajustan sus posiciones para mejorar gradualmente la solución.

Considerando un enjambre de N partículas, la posición en el espacio de la solución de cada una de ellas puede ser expresada como $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{iD})$. El cambio de posición de cada partícula se define como $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{iD})$, la mejor posición histórica de cada partícula se representa como $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \cdots, p_{iD})$, y finalmente $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \cdots, p_{gD})$ presenta la mejor posición obtenida de manera histórica por el enjambre. La actualización de la posición de cada partícula puede describirse con las Ecuaciones (12) y (13)

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (p_g^k - x_i^k), \qquad (12)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}, \qquad (13)$$

donde c_1, c_2 y w representan constantes del algoritmo y r_1, r_2 son números aleatorios entre 0 y 1.

5. RESULTADOS

La Figura 3 presenta una comparación entre la señal original con las características obtenidas empleando los niveles de descomposición wavelet previamente descritos y la FRFT para órdenes $[\alpha, \beta] = [1, 1]$ y $[\alpha, \beta] = [1.2577, 1.4678]$, estos últimos correspondientes a los obtenidos por el algoritmo PSO. La Figura 4 muestra los

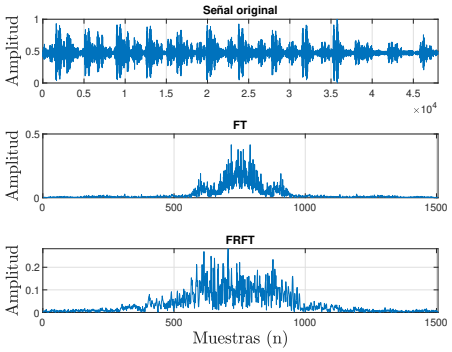


Figure 3. Comparativa de las características empleadas con el caso clásico y la señal original.

resultados obtenidos por el clasificador para la etapa de entrenamiento. Las predicciones correctas en la figura se muestran sobre la diagonal principal. Los resultados se encuentran normalizados por clase.

La Tabla 3 muestra una comparativa entre los índices presentados en las ecuaciones (9), (10) y (11) de la metodología utilizada para la extracción de características con su equivalente de orden entero y la clasificación utilizando las señales en el dominio temporal.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se empleó la FRFT en conjunto con RNAs para la clasificación de sonidos de anuros por especie. Para

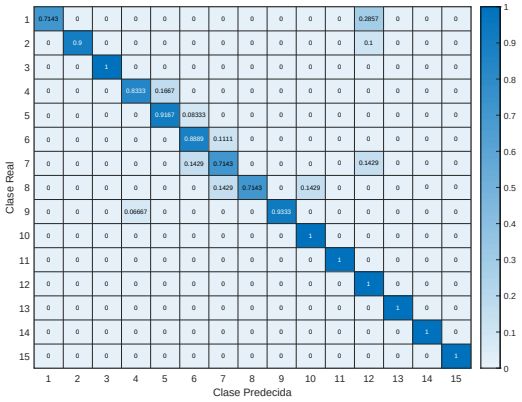


Figure 4. Matriz de confusión por el clasificador para la etapa de prueba.

Table 3. Comparación de la metodología empleada con su equivalente de orden entero y la clasificación con los datos en el dominio temporal.

	Señal original	Clásico	FRFT
Acc	29.41%	53.59%	91.27%
P	39.92%	54.47%	91.27%
Ex	14.38%	53.59%	91.27%
$[\alpha, \beta]$	$[NA, NA]$	$[1, 1]$	$[1.2577, 1.4678]$

la etapa de preprocesamiento los datos fueron filtrados para eliminar componentes de ruido ambiental y posteriormente segmentados en base a la amplitud de la señal. En la etapa de extracción de características se empleó la transformada wavelet para descomponer la señal y posteriormente se empleó la FRFT para la transformación de dos niveles de descomposición correspondientes a las frecuencias altas de la señal. En la etapa de entrenamiento, se empleó una red de tipo perceptrón con dos funciones de activación: softmax y ReLU. El entrenamiento se llevó a cabo utilizando el método ADAM.

La elección de utilizar la FRFT se basó en su capacidad para mejorar el análisis de señales de audio en comparación con los métodos clásicos, lo que resultó en una mayor precisión, la cual se ve reflejada en la clasificación, ya que es posible discriminar especies con cantos en los mismos rangos como es el caso de la clase 13 y 3 que tienen un amplio rango de frecuencias que coincide en rangos de otras especies, estos casos se pueden presentar en especies que pertenecen a la misma familia un caso de esto son las clases 4 a 8 las cuales pertenecen a la misma familia y comparten los rangos de frecuencia.

Este enfoque brinda un sistema robusto y preciso para la clasificación de sonidos de anuros al compararlo con su equivalente de orden entero, lo que puede tener aplicaciones importantes en la identificación de especies de animales. Esta tecnología no invasiva puede ser utilizada para la conservación de especies y el monitoreo de ecosistemas al permitir la observación precisa de la fauna sin perturbarla. Esto es crucial para la protección de especies en peligro de extinción y para comprender mejor la biodiversidad en su entorno natural.

ISSN: 2992-8338

7. AGRADECIMIENTOS

Carlos Daniel Solórzano Madrigal agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de una beca de maestría. Luis Felipe Ávalos Ruiz y Héctor Martin Cortés Campos agradecen el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de sus becas de doctorado. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT: Cátedras CONAHCyT para jóvenes investigadores 2014 y SNII-CONAHCyT.

REFERENCES

Alberto, Ó. (2015). *Monitoreo bioacústico de las poblaciones de anuros de la reserva de la biosfera Nahá, Chiapas, México*. Ph.D. thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Beltran, J. et al. (2020). Fractal dimension estimation of bird songs using the fractional fourier transform. *Applied Acoustics*, 165, 107334. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107334.

Bonada, N. et al. (2018). Biological impacts of underwater noise: suggestions for research and management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(6), 330–338. doi:10.1002/fee.1813.

Das, A. et al. (2019). Comparative analysis of vocalization of anuran species using fractional fourier transform and other signal processing techniques. *Ecological Informatics*, 51, 78–89. doi:10.1016/j.ecoinf.2019.02.004.

González, G. (1997). Series de fourier, transformadas de fourier y aplicaciones. *Divulgaciones matemáticas*, 5(1/2), 43–60.

Jin, L. et al. (2020). Frog call classification using deep neural networks with time-frequency representation. *Applied Acoustics*, 171, 107628. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107628.

Kubat, M. (1999). Neural networks: a comprehensive foundation by simon haykin, macmillan, 1994, isbn 0-02-352781-7. *The Knowledge Engineering Review*, 13(4), 409–412.

Laje, R., Cobo-Cuan, A., Ronco, F., and Castro, D. (2018). Application of fractional fourier transform to study the acoustic communication in anurans. *Ecological Informatics*, 47, 75–82. doi: 10.1016/j.ecoinf.2018.06.005.

Li, Z. et al. (2020). Whale sound classification using mel-frequency cepstral coefficients and deep learning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(2), EL146–EL151. doi:10.1121/10.0000635.

Namias, V. (1980). The fractional order fourier transform and its application to quantum mechanics. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 25(3), 241–265.

Niu, Y. et al. (2020). Bird sound classification using fractal features and multilayer perceptron. *Ecological Informatics*, 55, 101023. doi:10.1016/j.ecoinf.2019.101023.

Norton, M.P. and Karczub, D.G. (2003). *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge university press.

Oppenheim, A.V. and Schafer, R.W. (1999). *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall.

Ordóñez (2019). *Patrones temporales en el paisaje acústico del área de protección de flora y fauna Nahá, Chiapas, México*. Ph.D. thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Ozaktas, H.M. and Aytür, O. (1995). Fractional fourier domains. *Signal Processing*, 46(1), 119–124.

Pieretti, N., Farina, A., and Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The acoustic complexity index (aci). *Ecological indicators*, 11(3), 868–873.

Sarria-Paja, M. et al. (2019). Fractal fourier analysis for classification of bat echolocation calls. *Ecological Informatics*, 52, 119–128. doi:10.1016/j.ecoinf.2019.03.003.

Singh, S.P., Agarwal, A., and Gupta, A. (2021). Deep learning-based automatic classification of mammal vocalizations using a novel time-frequency representation. *Applied Acoustics*, 179, 108060. doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108060.

Xie, J., Colonna, J.G., and Zhang, J. (2021). Bioacoustic signal denoising: a review. *Artificial Intelligence Review*, 54, 3575–3597.

Zaguri, M., Kandel, S., Rinehart, S.A., Torsekar, V.R., and Hawlena, D. (2021). Protein quantification in ecological studies: a literature review and empirical comparisons of standard methodologies. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(7), 1240–1251.

Zhang, H. et al. (2021). Acoustic classification of bird species using fourier spectrum and convolutional neural network. *Ecological Informatics*, 61, 101218. doi: 10.1016/j.ecoinf.2021.101218.

ISSN: 2992-8338

Synthesis and characterization of CeO_2 Nanoparticles for photocatalytic degradation of contaminants in plasma technology

Quezada-Urbina Jesús[*], Vázquez-Vélez Edna[**], Martínez-Valencia Horacio[**],Torres-Islas Alvaro[*]

[*]Universidad Autónoma del estado de Morelos, C.P.62209

México (Tel: (777) 207-93-73; e-mail: jesus.quezadau@uaem.edu.mx).

[**]Instituto de ciencias físicas de la UNAM, C.P 62210 USA (e-mail: velez.edna@icf.unam.mx)

Abstract: Even after treatment, water quality has been affected by different emerging contaminants such as pharmaceutical compounds, pesticides, dyes, etc., reaching a critical situation that affects living beings. Although new methodologies have emerged to degrade these pollutants, more research is needed on efficient and viable solutions to be scaled. This work investigated the degradation of methylene blue (MB) dye using plasma and cerium oxide nanoparticles ($NpsCeO_2$) as a photocatalyst.

$NpsCeO_2$ were synthesized by the chemical precipitation method and characterized by Raman spectroscopy, XRD, UV-Vis, and transmission microscopy (TEM). CeO_2 (Nps) was used (15, 25, and 50 mg) as a photocatalyst in the plasma degradation process of MB (50 mg/L). The best experiment degraded MB by up to 90% in 40 min. The degradation process of MB is achieved through hydroxyl radicals generated by plasma, in addition to those generated by photocatalysis with NpsCeO2, which decreases the degradation time of MB. Based on the literature, the plasma process can degrade contaminants like other dyes or medications. Nps improve the plasma process by decreasing the treatment time.

Keywords: photocatalyst, plasma, degradation, nanoparticles.

1. INTRODUCCIÒN

En las últimas décadas, la contaminación del agua se ha convertido en un desafío global que amenaza la salud humana y los ecosistemas acuáticos. La presencia de contaminantes emergentes, como los compuestos orgánicos persistentes, plantean una gran preocupación debido a su resistencia a los tratamientos convencionales de purificación de agua.

En este contexto, la búsqueda de tecnologías eficientes y sostenibles para la degradación de contaminantes es una prioridad. Esto se puede lograr mediante procesos químicos o físicos; en esta investigación se busca degradar AM mediante una serie de reacciones óxido-reducción, las cuales reducen las moléculas de los colorantes hasta obtener estructuras sencillas que no representen un riesgo para el medio ambiente.

La corta vida útil de las especies reactivas y la alta reactividad del plasma pueden dificultar su aplicación eficiente en sistemas acuosos. Para superar estas limitaciones, se ha propuesto el uso de catalizadores que mejoren la eficiencia, en este trabajo se decidió utilizar nanopartículas de óxido de cerio (Nps CeO_2)

Se han estudiado con anterioridad las propiedades catalíticas del óxido de cerio y en tamaño nanométrico se espera que estas propiedades mejoren acelerando la degradación del AM.

2. DESARROLLO

2.1 Síntesis de Nps CeO_2

Las nanopartículas de óxido de cerio se sintetizaron utilizando el método de precipitación química, para ello, se preparó una solución con 25 mL de agua desionizada con 0.5 gr de ácido tánico y 1.9 gr de $CeCl_3$, los reactivos se disolvieron con baño ultrasónico. La solución se lleva a un pH de 8 agregando gota a gota una solución al 5% de hidróxido de sodio. A la solución obtenida se le agrega agua desionizada y se centrifuga a 4000 rpm por 15 minutos, se separa el sobrenadante del precipitado y se repite el procedimiento 2 veces con agua para eliminar la sal formada y 2 con etanol para eliminar el ácido orgánico. Los precipitados obtenidos se dejan secar por 12 horas a 80 °C, después se coloca el polvo seco en un crisol y se calcina a 450 °C durante 4 horas (Pathak et al. (2023)).

2.2 Proceso de degradación

El proceso de degradación de AM se realizó utilizando un arreglo como el mostrado en la figura 1, el cual consta de un ánodo y un cátodo que son varillas de acero inoxidable de 800 µm de diámetro conectados a una fuente de alto voltaje para generar el plasma. La solución de AM se recircula utilizando una bomba peristáltica a un flujo de 50 ml/min, quedando la solución en contacto con en el cátodo y con el plasma, y aumentando la interacción con el plasma.

ISSN: 2992-8338

Se escogió este sistema para el proceso de degradación, ya que al ser un sistema con flujo se considera que la degradación será más rápida que con sistemas estáticos, además al estar en contacto directo la solución de AM con el plasma, permite que las especies reactivas generadas por el plasma interaccionen de una forma más directa con la solución acelerando la degradación del colorante.

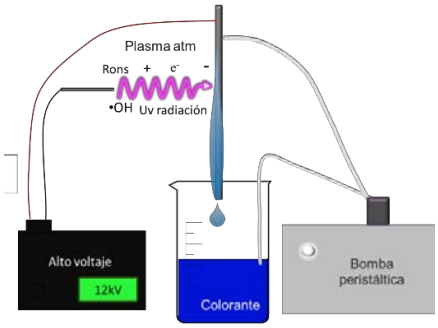


Figura 1. Sistema utilizado para los experimentos de degradación de azul de metileno.

2.3 Curva de calibración

Para realizar la curva de calibración se preparó una solución de AM a una concentración de [10 mg/L] y se diluyo a concentraciones de [5 mg/L], [2.5 mg/L], [1 mg/L], [0.5 mg/L] y [0.25 mg/L], cuyas absorbancias fueron determinadas. De los espectros de absorción UV-Vis de las soluciones, se graficaron las absorbancias obtenidas a una longitud de onda de 609 nm contra las concentraciones, esta gráfica se muestra en la figura 2, además, se realizó el ajuste a la ecuación de la recta "$y = mx + b$" para calcular:

Pendiente: 0.081

Intersección del eje: -0.017

Coeficiente de correlación: 0.999

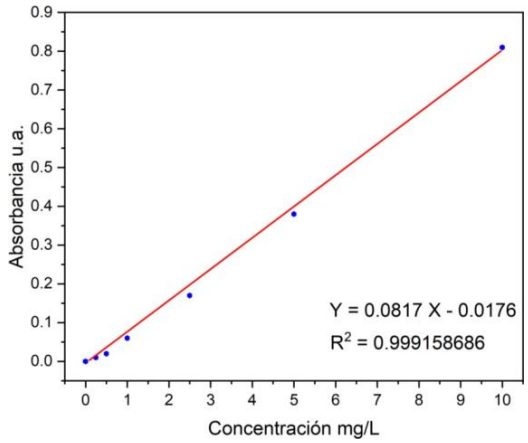


Figura 3. Curva de calibración de azul de metileno.

3. RESULTADOS

Se utilizaron diferentes técnicas de caracterización para asegurar la presencia de material nanométrico y determinar propiedades importantes de las Nps CeO_2. También se recaudaron del proceso de degradación de AM.

3.1 Uv-Vis

Se utilizó un Espectrómetro Uv-vis de la marca: Ocean optics modelo: qp450 para obtener los espectros de absorción de la Nps CeO_2. Para esta técnica se pesaron 6 mg de Nps CeO_2 y se dispersaron en 10 mL de etanol, se tomaron 3 mL de las nanopartículas suspendidas y se colocaron en una celda de cuarzo para obtener el espectro de absorción mostrado en la figura 3 el cual muestra una banda de absorción en 307 nm la cual es característica de la presencia de las Nps CeO_2 de acuerdo con la literatura donde se ha reportado en 303 nm (Nurhasanah et al. (2018)).

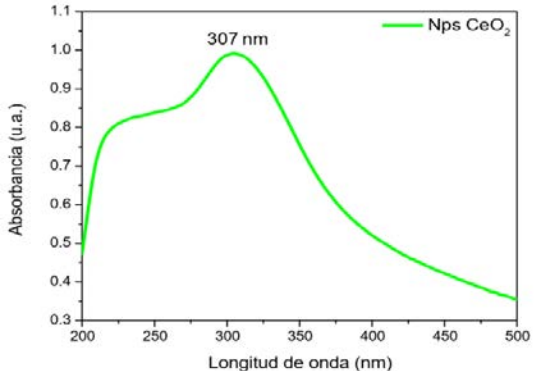


Figura 4. Espectro de absorción Uv-Vis de Nps CeO2

3.2 Raman

Se utilizó un microscopio confocal Raman de la marca: Bruker modelo: Senterra II con una cámara infinity 1 acoplada para obtener imágenes de la muestra analizada, el espectro de las Nps CeO_2 obtenido se observa en la figura 4 destacando un pico en 462 cm^{-1} que concuerda con lo reportado en la literatura donde se ha encontrado la señal de Nps CeO_2 a 465 cm^{-1}, por lo cual se puede inferir que hay presencia de Nps CeO_2 (Shanmugam et al. (2022)).

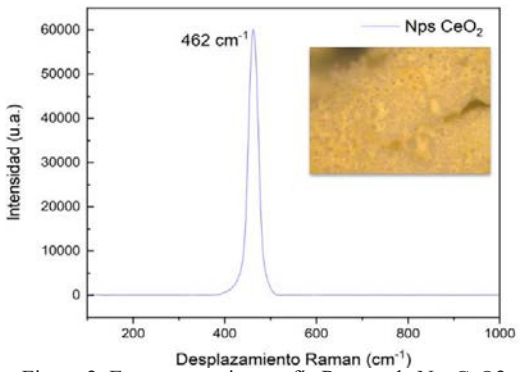


Figura 2. Espectro y micrografía Raman de NpsCeO2.

ISSN: 2992-8338

3.3 DRX

Se utilizó el difractómetro de rayos X de la marca: Bruker modelo: d2phaser para obtener el difractograma mostrado en la figura 5.

Mediante el difractograma se determinó la fase cristalina de las Nps CeO_2 la cual es cúbica centrada en las caras con base a los patrones de difracción 1,1,1 a 2Θ 29, 2,0,0 a 2Θ 33, 2,2,0 a 2Θ 47, 3,1,1 a 2Θ 56, 2,2,2 a 2Θ 59, 4,0,0 a 2Θ 69, 3,3,1 a 2Θ 76, 4,2,0 a 2Θ 79, 5,1,1 a 2Θ 88.

Además, se calculó el tamaño promedio del cristal y la micro deformación promedio mostrados en la tabla 1, estos se calcularon con las ecuaciones 1 y 2 Balaji et al. (2020).

$$D = \frac{k\lambda}{\beta\cos(\theta)} \qquad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4\tan(\theta)} \qquad (2)$$

D= tamaño promedio del cristal (nm)

K=constante de Scherrer para partículas esféricas

λ= longitud de onda de la fuente de rayos x

β = Ancho medio de pico

θ - posición angular de picos DRX, mitad de 2θ

Tabla 1. Concentración y absorbancia del AM.

Micro deformación	0.60
Tamaño promedio del cristal	33.23 nm

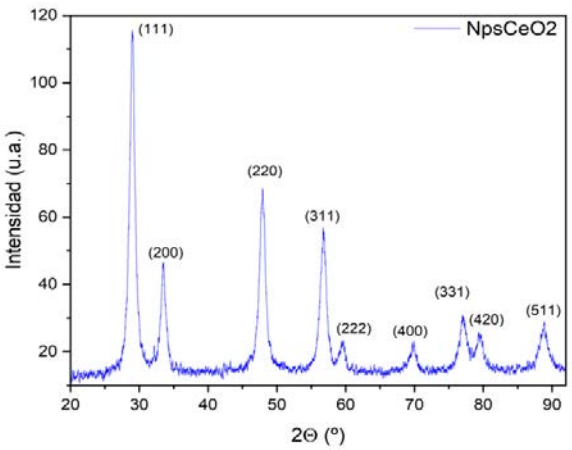


Figura 5. Difractograma de rayos X de las Nps CeO_2.

3.4 TEM

Se realizó el análisis de morfología y tamaño de las Nps CeO_2 para esto se utilizó un microscopio de transmisión electrónica (transmission electron microscope (TEM)) marca Zeiss de Oberkochen, Alemania, utilizando un voltaje acelerado de 80 kV.

Para preparar las muestras, las Nps CeO_2 se dispersaron en etanol en una relación 1:10 en 5 mL de etanol, se tomaron 5 µL que se colocaron en una rejilla de cobre recubierta de carbono Chibac-Scutaru et al. (2020).

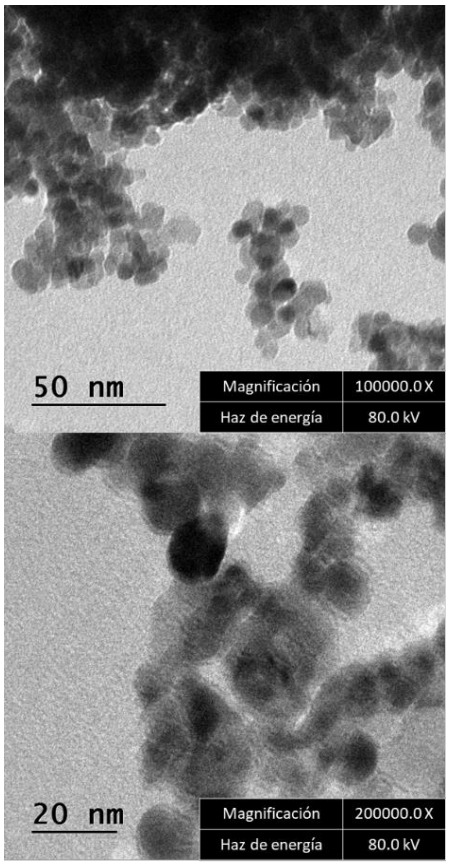


Figura 6. Micrografías a diferentes magnificaciones de las Nps CeO_2.

Se obtuvieron las micrografías mostradas en la figura 6, las cuales fueron tratadas con el software image J mismo con el que se midieron las partículas para realizar su histograma en el software Origin el cual se muestra en la figura 7 el tamaño promedio de partícula fue de 9 y 7 nm de acuerdo con las medidas tomadas, aunque en el histograma se observan partículas inferiores a 5 nm y mayores a 20 nm.

Se puede observar que la mayoría de las partículas tienen formas esféricas, aunque hay presencia de aglomerados en menor cantidad.

ISSN: 2992-8338

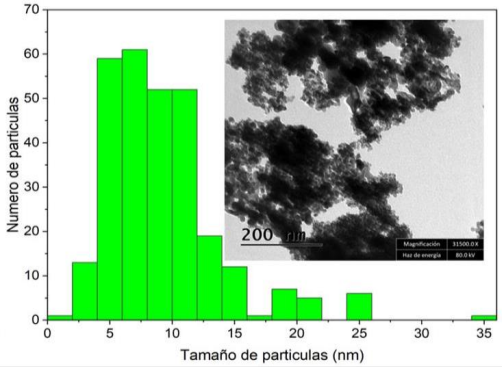


Figura 5. Histograma del tamaño y cantidad de Nps CeO_2

3.5 Degradación

Para determinar la eficiencia de degradación de AM se determinó el porcentaje de degradación para cada experimento en el tiempo, con la siguiente fórmula:

$$\%\, D = \frac{c_i - c_f}{c_i}\ (100) \qquad (3)$$

Siendo % D el porcentaje de degradación de AM a un determinado tiempo, Ci la concentración inicial de AM, Cf la concentración final a un determinado tiempo (determinada con base a la curva de calibración) GilPavas et al. (2017). Se determinaron los porcentajes de degradación de AM utilizando diferentes condiciones: iniciador de peróxido de hidrógeno, plasma, plasma/peróxido y plasma con NpsCeO_2. En la figura 8, se muestra gráficamente el %D de AM con base a las diferentes condiciones. Cuando se utilizó solo peróxido hubo degradación del AM, pero lenta, esto se debe a que el peróxido de hidrógeno libera radicales hidroxilos mismos que son capaces de degradar el colorante. Por otra parte, se obtuvo un resultado mejor con solo plasma que al utilizar plasma + peróxido, deduciendo que otras especies reactivas del plasma, como los nitratos o nitritos, intervienen también en la degradación del colorante. Al agregar las Nps CeO_2 en cantidades de 15, 25 y 50 mg, los resultados fueron mejores.

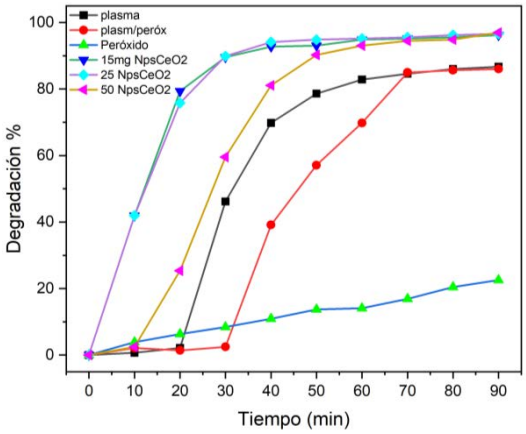


Figura 6. Porcentajes de degradación de A.M.

El mejor resultado obtenido fue con 25 mg de Nps de CeO_2, teniendo un inicio rápido de la degradación y llegando a valores por encima del 90% a los 90 minutos de tratamiento, en comparación con el de 50 mg, donde se observa que su aglomeración disminuye el área de absorción del AM, inhibiendo en un principio la generación de radicales hidroxilos. Esto es debido a que el proceso de oxidación del AM se lleva a cabo en la superficie de la las Nps de CeO_2, a través de la fotocatálisis activada por la energía de los fotones generados en el plasma.

Tabla 2. Porcentajes de degradación del AM a diferentes tiempos.

Tiempo	plasma	plasm perox	peróxido	15mg CeO2	25mg CeO2	50mg CeO2
0 min	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
10 min	0,70%	2,11%	3,88%	41,95%	41,95%	2,47%
20 min	2,11%	1,41%	6,34%	79,31%	75,78%	25,38%
30 min	46,18%	2,47%	8,46%	89,53%	89,88%	59,57%
40 min	69,79%	39,13%	10,93%	92,70%	94,11%	81,07%
50 min	78,60%	57,10%	13,75%	93,06%	94,82%	90,24%
60 min	82,83%	69,79%	14,10%	94,82%	95,17%	93,06%
70 min	84,60%	84,95%	16,92%	95,17%	95,52%	94,47%
80 min	86,01%	85,65%	20,44%	95,52%	96,23%	94,82%
90 min	86,71%	86,01%	22,56%	96,23%	96,58%	96,93%

3.6 Conductividad y pH

Durante todos los experimentos se midió el pH y la conductividad en periodos de 10 min. En la figura 9, se observa el comportamiento de estos dos parámetros, en todos los casos se observa que conforme avanza el tiempo de degradación el pH disminuye y la conductividad aumenta, lo que sirve como indicador de que las reacciones óxido reducción se están llevando a cabo con éxito por ende el proceso de degradación de AM se está realizando con éxito (Vergara et al. (2017)).

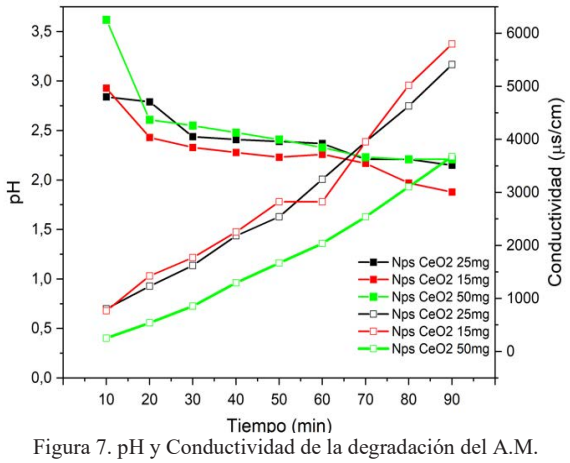


Figura 7. pH y Conductividad de la degradación del A.M.

ISSN: 2992-8338

3.7 Espectroscopía Raman mejorada en superficie

La espectroscopia Raman de superficie aumentada (SERS) fue realizada para determinar los grupos funcionales de los productos intermediarios generados en el proceso de degradación de AM. Para ello, se tomaron alícuotas cada 10 min durante el proceso de degradación y se colocaron sobre obleas de silicio depositando previamente nanopartículas de plata, las cuales aumentan el plasmón de la superficie y a la vez se acomplejan al intermediario orgánico, ambos fenómenos contribuyen al aumento de la detección de la molécula intermediaria.

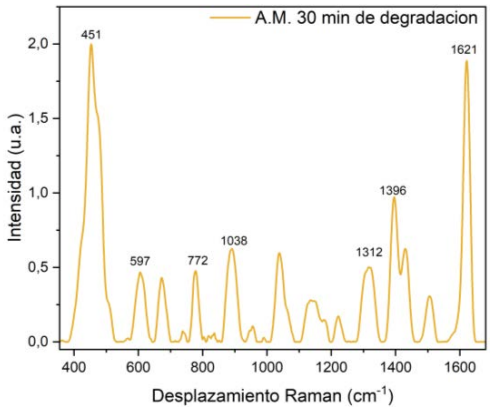


Figura 8. Espectros Raman de superficie mejorada a 30 minutos de la degradación de A.M.

Los espectros obtenidos (SERS) se muestran en la figura 10, y con estos se pudo determinar la ruta de degradación del AM mostrada en la figura 11, de igual manera se observa como las señales van disminuyendo conforme avanza el tiempo hasta observar solamente la señal característica de las nanopartículas de plata a los 90 minutos (Vázquez-Vélez et al. (2020)).

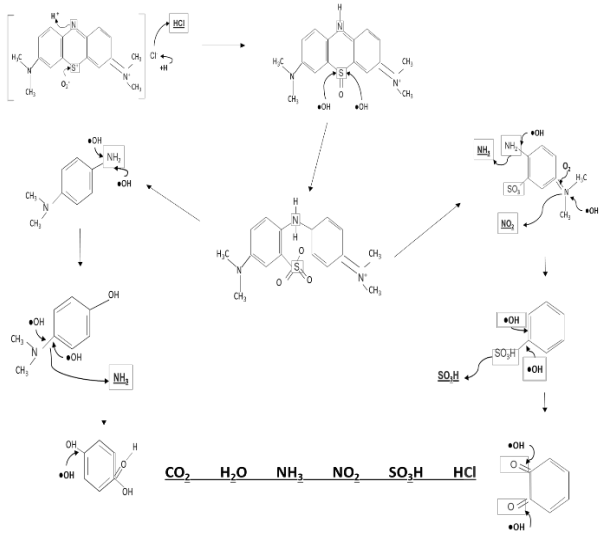


Figura 9. Ruta de degradación del azul de metileno

4. CONCLUSIONES

El método de síntesis utilizado para la obtención de Nps CeO_2 es útil para conseguir nanopartículas con propiedades fisicoquímicas adecuadas como fotocatalizador en las reacciones de degradación de AM. pero, se considera necesario soportar las Nps CeO_2 en un material, para evitar interferencia al momento de las mediciones de control a nivel laboratorio, y su escalabilidad no sería factible al dejar las Nps dispersas en la solución a degradar. El proceso de degradación de AM por plasma es eficiente comparado con métodos como fotofenton o fotocatálisis. El mejor resultado obtenido por el método propuesto en esta investigación ha logrado degradar concentraciones de [50mg/L] de AM hasta en un 90% en 40 minutos.

REFERENCIAS

Balaji, Siripireddy, Badal Kumar Mandal, L. Vinod Kumar Reddy, and Dwaipayan Sen. (2020). "Biogenic Ceria Nanoparticles (CeO2 NPs) for Effective Photocatalytic and Cytotoxic Activity" Bioengineering 7, no. 1: 26. https://doi.org/10.3390/bioengineering7010026

Chibac-Scutaru, Andreea L., Viorica Podasca, Ioan A. Dascalu, and Violeta Melinte. (2022). "Exploring the Influence of Synthesis Parameters on the Optical Properties for Various CeO2 NPs" Nanomaterials 12, no. 9: 1402. https://doi.org/10.3390/nano12091402

GilPavas, Edison, Dobrosz-Gómez, Izabela, & Gómez-García, Miguel Á. (2014). Degradación y Mineralización de Tartrazina mediante Electro-oxidación: Optimización de las Condiciones de Operación. Información tecnológica, 25(4), 163-174. https://doi.org://dx.doi.org/10.4067/S0718

Nurhasanah, Iis & Safitri, W & Arifin, Zaenal & Subagio, Agus & Windarti, Tri. (2018). Antioxidant activity and dose enhancement factor of CeO 2 nanoparticles synthesized by precipitation method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 432. 012031. 10.1088/1757-899X/432/1/012031.

Pathak, Vidhi & Lad, Paras & Thakkar, Anjali & Thakor, Parth & Deshpande, M. & Pandya, Swati. (2023). Synthesis, characterization and applications of cubic fluorite cerium oxide nanoparticles: A comprehensive study. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100111.

Vázquez-Vélez, Edna, Horacio Martínez, and Fermín Castillo. 2021. "Degradation of Acid Red 1 Catalyzed by Peroxidase Activity of Iron Oxide Nanoparticles and Detected by SERS" Nanomaterials 11, no. 11: 3044. https://doi.org/10.3390/nano11113044

Vergara Sánchez J., C. Torres Segundo, E. Montiel Palacios, A. Gómez Díaz, P. G. Reyes Romero and H. Martinez Valencia, "Degradation of Textile Dye AB 52 in an Aqueous Solution by Applying a Plasma at Atmospheric Pressure," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 3, pp. 479-484, March 2017, https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2663845.

ISSN: 2992-8338

Proposal for a Logistics Regression Model for the Classification of Urban Solid Wastes with Image Processing

V.M. Romero-Juárez*, M. Castro-Bello*, V. López-Caballero, C. Morales-Morales*, C.V. Marmolejo-Vega*, S.R. Zagal-Barrera*, A. Bárcenas-Nava***

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruiz Massieu, No. 5, Fracc. Villa Moderna, CP. 39090, Chilpancingo, Guerrero.*

***Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos.*

Abstract: The environmental problem of Urban Solid Waste Management (USWM) has been increasing exponentially in recent years, this situation is expected to worsen. This article proposes the development of a Robust Logistics Regression Model (RLRM) for the classification of Urban Solid Waste (USW) in organic and inorganic, using convolutionary neural networks that minimize atypical data sensitivity, as well as analysis of parameters and validation of the model that contributes to decision-making.

Keywords: urban solid waste, convolutionary neural networks, logistical regression, model, parameters.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la sustentabilidad ambiental y de los procesos de urbanización, privatización y descentralización; la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) actualmente constituye una preocupación de singular importancia por sus impactos directos e indirectos, algunos de ellos irreversibles y permanentes, tanto en el medio ambiente (aire, agua, tierra, paisaje) como la salud. El efecto ambiental más evidente del manejo inadecuado de los RSU, son el deterioro estético de las ciudades, del paisaje natural, urbano, rural, con la consecuente devaluación, tanto de los predios donde se localizan los vertederos como de las áreas vecinas por el abandono y la acumulación de la basura, sin embargo, entre los efectos ambientales más severos están la contaminación del suelo, del aire y los cuerpos de agua, ocasionada por el vertimiento directo de los residuos (Rondon-Toro *et al*., 2016).

En los últimos años la tecnología y la modelación matemática han avanzado de manera considerable y sus aplicaciones en áreas del conocimiento, como en las ciencias ambientales, salud, educación, seguridad, entre otras.

Investigaciones en Golbaz *et al*. (2018), han desarrollado modelos de Regresión Lineal Múltiple (MLR) con aprendizaje automático basados en neuronas y algoritmos de Kernel para predecir RSU en hospitales; así como modelos de regresión multivariable para pronosticar la cantidad de RS (Al-Salem *et al*., 2018). Por otra parte, Ayeleru *et al*. (2018) determinaron la caracterización y el patrón de los RSU, mediante el software Minitab para realizar la previsión estadística basada en datos históricos e indicadores de pronósticos, además se usó el modelo de tendencia lineal para el análisis de tendencia temporal; y Kumar *et al*. (2021) proponen una solución automatizada basada en Inteligencia Artificial (IA) para clasificar las corrientes de residuos médicos relacionados con el COVID mediante histogramas en escala de grises, propiedades del histograma estadístico de primer orden, función de Patrón Binario Local (PBL), esquema de fusión a nivel de decisión.

La población mundial genera aproximadamente 2,010 millones de toneladas de RSU anualmente, al menos el 33% de esa cantidad no se gestiona de manera ambiental y segura. Para 2030, se espera que se generen 2,590 millones de toneladas al año, y para el 2050, se alcancen los 3,400 millones (Kaza *et al*., 2018). En América Latina la clasificación de los RSU se realiza de manera manual con el riesgo de que operarios contraigan enfermedades como tifus, cólera, sarnas, hepatitis, entre otras, lo que sugiere la necesidad de desarrollar tecnologías con la aplicación de modelos matemáticos para optimizar tiempos y eficiencia en la clasificación de los RSU (Sáez y Urdaneta, 2014).

A falta de estrategias para mejorar la protección y cuidado del medio ambiente, diversas investigaciones han aplicado metodologías para clasificar RSU con procesamiento de imágenes y RNC, no obstante, de tener buenos resultados, son computacionalmente muy costosas, carecen de interpretación de covariables, generan sobreajuste, son sensibles a datos heterogéneos y les falta estimación y análisis de parámetros (Clavijo *et al*., 2022).

Esta investigación propone el diseño y desarrollo de un modelo estadístico probabilístico de regresión logística con procesamiento de imágenes de RSU aplicando redes neuronales convolucionales con la finalidad de contribuir al cuidado del medio ambiente.

ISSN: 2992-8338

1.1. Trabajos relacionados

Trabajos relacionados como el de Huang *et al*. (2020) proponen un modelo de clasificación combinado basado en tres modelos CNN preentrenados (VGG19, DenseNet169 y NASNetLarge) para procesar la base de datos ImageNet. Mao *et al*. (2021) aplicaron el modelo de red neuronal convolucional (CNN) DenseNet121 para el reconocimiento de imágenes, y para la evaluación del rendimiento utilizaron el conjunto de datos TrashNet compuesto por un total de 2,527 imágenes con seis categorías de residuos diferentes, además del aumento de datos, y se plantearon como objetivo utilizar el algoritmo genético (GA).

Otro proyecto, es el de Hurst *et al*. (2022) donde utilizaron un conjunto de datos de clasificación de residuos para evaluar el rendimiento de una red neuronal convolucional de cinco capas, la cual se entrenó con dos resoluciones de imagen diferentes.

En Brasil se desarrollaron modelos de predicción estadística para el valor calorífico basados en datos experimentales tanto con el uso de la composición gravimétrica y/o el análisis elemental/próximo y el contenido de la humedad de los residuos recogidos (Drudi *et al*., 2019). Clavijo *et al*. (2022) en la universidad EAFIT de Medellín, Colombia realizaron dos modelos de clasificación con base en la regresión logística, en su versión clásica y en su versión robusta, donde se aplicó el coeficiente de correlación de Kendall, el coeficiente de correlación de Pearson y aplicaron el algoritmo de detección de bordes de Canny para el suavizado de imágenes, obtención de gradientes, supresión de falsos máximos y el umbral de histéresis.

Y en México Salazar y Filemón (2020), desarrollaron una aplicación para la identificación de botellas PET, papel y cartón, en el que se implementó el uso de una Red Neuronal Convolutiva (RNC).

2. METODOLOGÍA

Para efectos de este trabajo, se usará el conjunto de imágenes del repositorio trashnet, el cual abarca seis categorías: vidrio, papel, carton, metal y basura.
Actualmente, el conjunto de datos consta de 2,527 imágenes: 501 vidrio, 594 papel, 403 cartón, 482 de plástico, 410 metales, y 137 basura, todo el dataset se ha redimensionado a 512 x 384.

Con la finalidad de reducir la sensibilidad de datos atípicos, se aplicarán redes neuronales convolucionales y la ecuación de distribución de probabilidad, ecuación 1, figura 1.

$$y_i = x'_i\beta + \varepsilon_i \qquad (1)$$

donde $x'_i = [1, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}], \beta' = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]$, y la variable de respuesta y_i toma los valores de 0 (orgánico) o 1 (inorgánico). Se supondrá que la variable y_i es una variable aleatoria de Bernoulli, cuya distribución de probabilidad es, tabla 1:

Tabla 1. Distribución de probabilidad.

y_i	**Probabilidad**
1	$P(y_i = 1) = \pi_i$
0	$P(y_i = 0) = 1 - \pi_i$

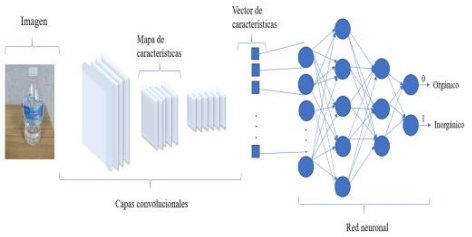


Figura 1. Clasificación de RSU con una red neuronal convolucional.

3. RESULTADOS

Los resultados esperados es un MRLR que clasifique RSU en orgánicos e inorgánicos, que minimize el error de estimación y la sensibilidad a datos atípicos, así como la propuesta de una base de datos de RSU orgánicos.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo pondrá a disposición un modelo de regresión logística robusto asi como la aplicación de una red neuronal convolucional para la clasificación de RSU en orgánicos e inorgánicos.

REFERENCIAS

Alejandra Vélez Clavijo, M., Moreno Ramírez, V., Palacio Jaramillo, A., José Wilches Rivas Asesor, J., Laniado Rodas, H., 2021. Regresión logística robusta y generación de datos sintéticos para la clasificación de residuos sólidos. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18263.55204

Al-Salem, S.M., Al-Nasser, A., Al-Dhafeeri, A.T., 2018. Multi-variable regression analysis for the solid waste generation in the State of Kuwait. Process Safety and Environmental Protection 119. https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.07.017

Ayeleru, O.O., Okonta, F.N., Ntuli, F., 2018. Municipal solid waste generation and characterization in the City of Johannesburg: A pathway for the implementation of zero waste. Waste Management 79. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.026

Drudi, K.C.R., Drudi, R., Martins, G., Antonio, G.C., Leite, J.T.C., 2019. Statistical model for heating value of municipal solid waste in Brazil based on gravimetric composition. Waste Management 87, 782–790. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.03.012

Golbaz, S., Nabizadeh, R., Sajadi, H.S., 2019. Comparative study of predicting hospital solid waste generation using multiple linear regression and artificial intelligence. Journal of Environmental Health

ISSN: 2992-8338

Science and Engineering 17. https://doi.org/10.1007/s40201-018-00324-z

Huang, G.L., He, J., Xu, Z., Huang, G., 2020. A combination model based on transfer learning for waste classification. Concurr Comput 32, e5751. https://doi.org/10.1002/CPE.5751

Hurst, W., Ebo Bennin, K., Kotze, B., Mangara, T., Nnamoko, N., Barrowclough, J., Procter, J., 2022. Solid Waste Image Classification Using Deep Convolutional Neural Network. Infrastructures 2022, Vol. 7, Page 47 7, 47. https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES7040047

Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

Kumar, N.M., Mohammed, M.A., Abdulkareem, K.H., Damasevicius, R., Mostafa, S.A., Maashi, M.S., Chopra, S.S., 2021. Artificial intelligence-based solution for sorting COVID related medical waste streams and supporting data-driven decisions for smart circular economy practice. Process Safety and Environmental Protection 152. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.026

Mao, W.L., Chen, W.C., Wang, C.T., Lin, Y.H., 2021. Recycling waste classification using optimized convolutional neural network. Resour Conserv Recycl 164, 105132. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105132

Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining, G.G., 2006. Introduccion al Analisis de Regresión Lineal, Syria Studies.

Rondon Toro, E., Szanto Narea, M., Pacheco, J.F., Contreras, E., Galvez, A., 2016. Guia General para la gestion de residuos solidos domiciliarios. Manuales de la CEPAL.

Sáez, A., Urdaneta, J.A., 2014. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe, Omnia Año.

Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (RI - TecNM): Desarrollo de una aplicación para la identificación de PET, cartón y papel por medio de una red convolutiva [en línea], (sin fecha). Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (RI - TecNM): Home. [Consultado el 11 de noviembre de 2023]. Disponible en: https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/2688

GitHub - garythung/trashnet: Dataset of images of trash; Torch-based CNN for garbage image classification [en línea], (sin fecha). GitHub. [Consultado el 11 de noviembre de 2023]. Disponible en: https://github.com/garythung/trashnet

ISSN: 2992-8338

Peasant Environmental Education Program for the Agroecological

L. Gómez-Muñoz, M. Castro-Bello*, C. Morales-Morales*, A. Jiménez-Alejo*, C.V. Marmolejo-Vega*, A. González-Lorence***

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruiz Massieu, No. 5, Fracc. Villa Moderna, C.P 39090, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero.*

** *Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, San Juan del Río, Querétaro, C.P. 76800, México.*

Abstract: Millions of tons of Agricultural Residues (AR) are generated worldwide each year. Converting them into useful products is a profitable, ecological, and sustainable waste management strategy. Agroecology offers an alternative approach to production that promotes biodiversity conservation, social cohesion, and climate change adaptation. This research aimed to implement a Peasant Environmental Education Program (PEEP) for agroecological transition in the Piedra Boluda locality, Ometepec municipality, Guerrero. The methodology consisted of three phases: a) Introduction of PEEP, b) Conducting participatory workshops, and c) Field practice. Results included collaborative participation from the working group members, adoption of composting and vermicomposting techniques, establishment of a composting module, and installation of vermicomposting beds. The implementation of PEEP with the local group of farmers received positive feedback in each workshop, leading to the conclusion that environmental education is a fundamental strategy for agroecological transition.

Keywords: Environmental education, Farmers, Agroecology, Composting, Vermicomposting, Agricultural waste.

1. INTRODUCCIÓN

La generación y gestión de residuos sólidos urbanos es un desafío que enfrenta la humanidad, los cuales están relacionados con el saneamiento, la vida saludable, la calidad del aire, el cambio climático, seguridad alimentaria y sostenibilidad ambiental. Cada año se generan millones de toneladas de residuos agrícolas, su eliminación y aprovechamiento son de preocupación para los gobiernos y otras partes interesadas, la conversión de desechos agrícolas en productos útiles es una estrategia rentable, ecológica y sostenible para su gestión (Awogbemi & Kallon, 2022).

La agroecología incluye la aplicación de principios ecológicos al diseño y gestión de sistemas alimentarios sostenibles (Rivera-Ferre et al., 2021), sus estrategias son una alternativa para la producción que favorecen la conservación de la biodiversidad, cohesión social y la adaptación al cambio climático (Cortés et al., 2023).

Algunos autores explican el uso y necesidad de la educación agroecológica para la soberanía alimentaria en el ámbito formal y no formal (Rivera-Ferre et al., 2021). La agroecología es un enfoque que fomenta la transición a sistemas alimentarios para la conservación de los recursos y el mejoramiento del bienestar humano (Teixeira et al., 2018). A manera de ejemplo, se han adoptado prácticas agroecológicas en el sector vitivinícola en la provincia de Trento, Italia (Garini et al., 2017). La intervención agroecológica en Malawi en la producción familiar y la diversidad de la dieta (Kansanga et al., 2021). La agroecología como herramienta para mejorar el metabolismo energético y la gestión económica en pequeños productores de cacao en la Amazonía ecuatoriana (Caicedo-Vargas et al., 2023).

Así mismo existen diversas investigaciones que ofrecen alternativas para hacer frente a la gestión inadecuada de los residuos orgánicos provenientes de diferentes ámbitos: hogares, escolares, institucionales y agrícolas/comunitarios. Como el realizado por Torrijos et al., (2021) que utilizan la técnica de compostaje para el tratamiento de residuos alimentarios y jardines en un campus de la Universidad de Coruña, España, con el fin de prevenir la generación de residuos así mismo contribuir a la promoción y difusión de prácticas agrícolas sustentables. Mientras que Wei et al., (2021) aborda el aprovechamiento de residuos de alimentos de hogares a través del compostaje en la ciudad de Linhu y Suzhou China, donde el fertilizante orgánico obtenido se utilizó en la producción de arroz. Geethamani et al., (2021) Propone el uso del compostaje para el aprovechamiento de los residuos de jardínes en el instituto de Tecnología Bannari en el distrito de Erode en India con el fin de convertirlos en fertilizante orgánico para nutrición de las plantas. Y Chang et al., (2021) utilizaron rastrojo de maíz, arroz y residuos de cultivo de jitomate para la preparación de composta con el fin de evaluar las comunidades microbianas y los factores físico-químicos del proceso.

El crecimiento demográfico y la urbanización desacelerada provocan una mayor generación de residuos y al mismo tiempo

ISSN: 2992-8338

ejercen una fuerte presión sobre el medio ambiente, por la alta demanda de recursos, principalmente para satisfacer las necesidades alimentarias.

El incremento de la producción de alimentos exige el uso desmedido e irracional de insecticidas y fertilizantes químicos, los cuáles generan afectación significativa en los ecosistemas, además del desaprovechamiento de los residuos agrícolas los cuales son ricos en materia orgánica y representan una fuente importante de fósforo (Xie et al., 2023)

Anualmente se generan toneladas de Residuos Agrícolas (RA) sin convertirlos en productos útiles como una estrategia rentable, ecológica y sostenible (Awogbemi & Kallon, 2022). En consecuencia, la falta de implementación de PEAC´s para la transición agroecológica es evidente ante la crisis ambiental que se vive actualmente.

Esta investigación aborda la implementación de un programa de educación ambiental campesino (PEAC) para el aprovechamiento de residuos agrícolas en la localidad de Piedra Boluda, municipio de Ometepec, Guerrero, México.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

Este estudio se realizó en la localidad de Piedra Boluda, municipio de Ometepec; ubicada en la Región Costa Chica del Estado de Guerrero, (98°26'35.888 W, 16°39'12.240 N), Figura 1, (INEGI 2023).

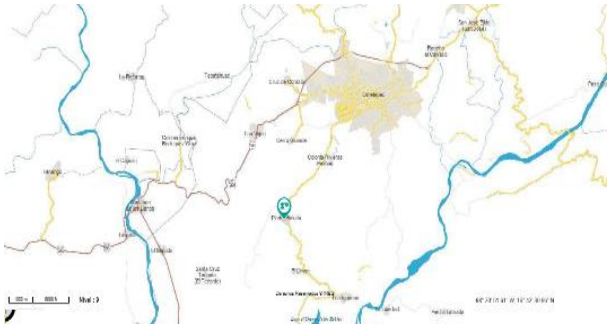


Figura 1. Área de estudio (Mapa digital INEGI 2023).

2.2 Población

Cuenta con una población total de 329 habitantes y 84 viviendas, su actividad principal es el cultivo o cosecha de productos agrícolas, donde trasciende la producción maíz.

2.3 Presentación del PEAC

- Presentación con las autoridades locales:

  Esta etapa permitió que en conjunto con las autoridades locales identificar a los campesinos participantes en el estudio, así también al productor líder

- Presentación del PEAC a los campesinos:

Los campesinos mencionaron la falta de conocimiento acerca de la elaboración y producción de composta y vermicomposta. Por lo que les pareció difícil implementar este tipo de técnicas y se mostraban renuentes. Aunado a esto aludieron la escasa participación de las autoridades gubernamentales (SAGADEGRO, SADER) en la impartición de capacitaciones para el aprovechamiento de los RA por lo cual se sienten desprotegidos y además tal situación aumenta su apatía. Afirmaron que los RA históricamente en su comunidad son quemados para iniciar con el nuevo ciclo agrícola.

Para contrarrestar los factores adversos como el desconocimiento y falta de experiencia de parte de los campesinos, previo a la implementación del PEAC se desarrollaron actividades y talleres de concientización que permitieron la integración del grupo de trabajo campesinos e instructores .

2.4 Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación se describen en las tablas 1 y 2.

Compostaje	
Hoja seca	Palas, bieldos, cubetas
Hoja verde	Machete
Estiércol caprino	Plástico
Agua	Papel pH

Tabla 1. Materiales e insumos para la Composta

Lombricomposta	
Lombriz roja californiana	Bieldos, Cubetas
Materia orgánica semicomposteada.	Machete
Agua	Camas de mampostería
	Papel PH

Tabla 2. Materiales e insumos para Lombricomposta

Las diferentes etapas de la metodología aplicada se describen en la figura 2.

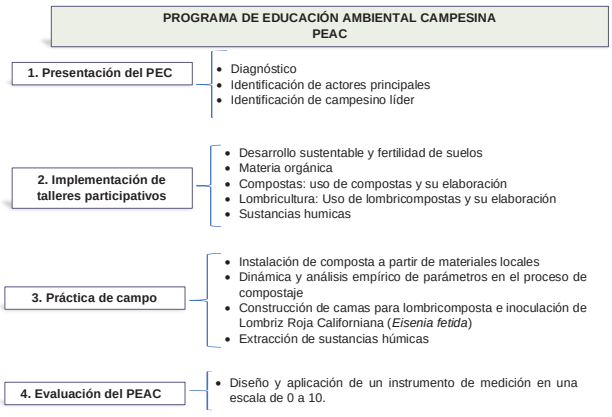


Figura 2. Diagrama del Proceso metodológico

3. Resultados

Los resultados derivados de la implementación del PEAC fueron:

ISSN: 2992-8338

- El total de participantes en este estudio fue de 14 personas distribuidos, figura 5.

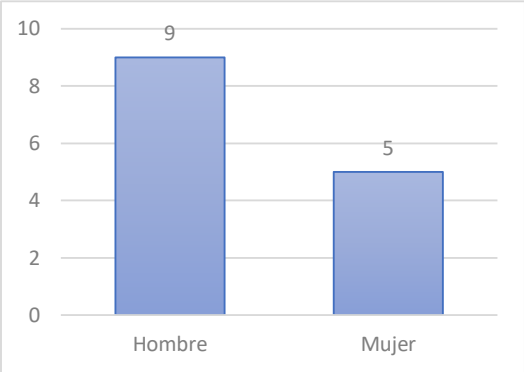


Figura 5. Participantes por género

- La participación colaborativa del grupo de trabajo.
- La apropiación de las técnicas de compostaje y lombricomposta.
- Se logró el establecimiento del módulo de elaboración de compostas. Figura 6

Figura 6. Adopción de la técnica de compostaje.

- Instalación de cuatro camas para la producción de lombricomposta (figura 7).

Figura 7. Adopción de la técnica de compostaje.

- Se realizó la evaluación de conocimientos a través de un instrumento con una escala de 0 a 10.
- El promedio global del nivel de conocimientos fue de:

$$\tilde{x} = 8.29\ puntos\ con\ \text{una}\ desviación\ estandar\ S = 0.9139$$

4. CONCLUSIONES

La experiencia de la implementación del PEAC con el grupo de campesinos de la localidad de Piedra Boluda, resulto ser exitosa, debido a que el módulo permite promover la educación ambiental para la transición agroecológica.

Este estudio tiene implicaciones para los tomadores de decisiones en los sectores de agricultura, sociedad y ambiente.

Los campesinos se mostraron receptivos en cada taller impartido, por tanto, se concluye que la educación ambiental es una estrategia fundamental para la transición agroecológica y así contribuir a la disminución de los efectos nocivos al medio ambiente.

REFERENCIAS

Awogbemi, O., & Kallon, D. V. Von. (2022). Pretreatment techniques for agricultural waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *6*. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100229

Caicedo-Vargas, C., Pérez-Neira, D., Abad-González, J., & Gallar, D. (2023). Agroecology as a means to improve energy metabolism and economic management in smallholder cocoa farmers in the Ecuadorian Amazon. *Sustainable Production and Consumption*, *41*, 201–212. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.08.005

Chang, H. qing, ZHU, X. hui, WU, J., GUO, D. yong, ZHANG, L. he, & FENG, Y. (2021). Dynamics of microbial diversity during the composting of agricultural straw. *Journal of Integrative Agriculture*, *20*(5), 1121–1136. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63341-X

Cortés, J., Vieli, L., & Ibarra, J. T. (2023). Family farming systems: An index-based approach to the drivers of agroecological principles in the southern Andes. *Ecological Indicators*, *154*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110640

Garini, C. S., Vanwindekens, F., Scholberg, J. M. S., Wezel, A., & Groot, J. C. J. (2017). Drivers of adoption of agroecological practices for winegrowers and influence from policies in the province of Trento, Italy. *Land Use Policy*, *68*, 200–211. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.07.048

Geethamani, R., Soundara, B., Kanmani, S., Jayanthi, V., Subaharini, T. R., Sowbiyalakshmi, V., & Sowmini, C. (2021). Production of cost affordable organic manure using institutional waste by rapid composting method. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 764–768. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.803

Kansanga, M. M., Kangmennaang, J., Bezner Kerr, R., Lupafya, E., Dakishoni, L., & Luginaah, I. (2021). Agroecology and household production diversity and dietary diversity: Evidence from a five-year agroecological intervention in rural Malawi. *Social*

ISSN: 2992-8338

Science and Medicine, *288*. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113550

Rivera-Ferre, M. G., Gallar, D., Calle-Collado, Á., & Pimentel, V. (2021b). Agroecological education for food sovereignty: Insights from formal and non-formal spheres in Brazil and Spain. *Journal of Rural Studies*, *88*, 138–148. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.10.003

Teixeira, H. M., van den Berg, L., Cardoso, I. M., Vermue, A. J., Bianchi, F. J. J. A., Peña-Claros, M., & Tittonell, P. (2018). Understanding farm diversity to promote agroecological transitions. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(12). https://doi.org/10.3390/su10124337

Torrijos, V., Calvo Dopico, D., & Soto, M. (2021). Integration of food waste composting and vegetable gardens in a university campus. *Journal of Cleaner Production*, *315*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128175

Wei, Y., Wang, N., Lin, Y., Zhan, Y., Ding, X., Liu, Y., Zhang, A., Ding, G., Xu, T., & Li, J. (2021). Recycling of nutrients from organic waste by advanced compost technology- A case study. *Bioresource Technology*, *337*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125411

Xie, S., Tran, H. T., Pu, M., & Zhang, T. (2023). Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of agricultural organic waste: Research trends. *Materials Science for Energy Technologies*, *6*, 331–342. https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.02.006

ISSN: 2992-8338

Microplastics, Macro Problem: A Contemporary Brief Review of Microplastic Pollution and Its Possible Long-term Consequences

Andrés López Moreno*, E. A. Chávez-Urbiola*, Adriana Hernández Rangel, Juan Terven*, Ana Isabel Sanchis-Castillo*, Juan Bautista Hurtado Ramos***

**Instituto Politécnico Nacional CICATA-QRO, Querétaro Qro, México C.P. 76090, (Tel: +52 442 229 0804 Ext 81047; e-mail: eachavezu@ipn.mx).*

*** Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, CDMX, México C.P. 07700, México (Tel: +52 442 229 0804 Ext 810; e-mail: adhernandezra@ipn.mx).*

Abstract: Microplastic pollution, a growing environmental concern, is analyzed in this paper, focusing on its global impact and the urgent need for practical solutions. Originating from various sources like industrial activities and the breakdown of larger plastics, these tiny particles have infiltrated ecosystems, affecting water, soil, and air. This paper highlights the dramatic increase in plastic production, from 2 million metric tons in 1950 to 460 million in 2019, and its correlation with the rise in microplastic pollution. In this study, we examine the production and consequences of microplastics, delving into the long-term effects on ecosystems, human health, and the economy, with a particular focus on Mexico to illustrate regional differences. The paper emphasizes the need for innovative approaches in material science, improved recycling methods, and global collaboration to address this issue. It advocates for a shift towards sustainable practices and a circular economy, coupled with heightened public awareness, to mitigate the impacts of microplastic pollution and ensure environmental resilience.

Keywords: Microplastic Pollution, Environmental Implications, Global Microplastic Dispersion, Microplastics health risks, Circular economy

1. INTRODUCTION

The emergence of plastic has undoubtedly represented a noteworthy achievement in the history of human innovation. The production and utilization of plastic materials have experienced significant growth since their initial development in the early 20th century, marked by the introduction of Bakelite, a synthetic plastic, in 1907 (Chalmin, 2019). The widespread presence of plastic in various industries, such as packaging, healthcare, transportation, and consumer goods, can be attributed to its versatility, durability, and cost-effectiveness. The widespread utilization of plastic has resulted in significant environmental consequences.

As plastic production soared, so did the waste associated with it. Global plastic production, which stood at a modest 2 million metric tons in 1950, catapulted to a staggering 460 million metric tons in 2019 (Geyer et al., 2017). The burgeoning production has engendered a parallel crisis of microplastic pollution. Microplastics, defined as plastic fragments less than 5mm in size (Fu et al., 2020), have permeated various environmental compartments, including water bodies, soil, and the atmosphere, posing grave threats to ecology and human health.

The ramifications of microplastic pollution are manifold and extend beyond the visible spectrum of environmental degradation. The insidious infiltration of microplastics into food chains has potential implications for biodiversity, wildlife, and human health. Moreover, microplastics serve as vectors for harmful pathogens and toxic chemicals, exacerbating the risks associated with their presence in ecosystems. The potential long-term consequences of microplastic pollution are yet to be fully elucidated. Still, they

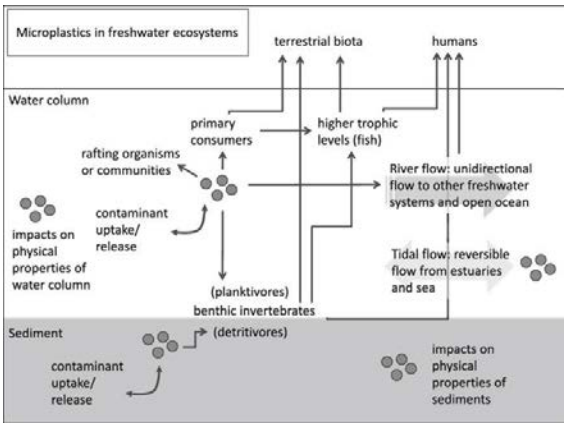


Figure 1. Possible pathways and interactions of microplastics from fresh water sources, water column inhabitants and terrestrial biota including humans (Eerkes-Medrano et al., 2015).

ISSN: 2992-8338

may include pervasive contamination of natural resources, detrimental effects on wildlife, and a significant toll on public health and economies.

The urgency to address microplastic pollution has never been more pronounced. The discourse surrounding microplastic pollution has evolved from mere acknowledgment to a pressing need for robust research, informed policymaking, and effective mitigation strategies. This paper endeavors to provide a comprehensive overview of the status of microplastic pollution, explore its implications on sustainability, delve into the regulatory landscape, and shed light on the situation in Mexico while identifying opportunities and challenges that lie ahead in combating this modern-day menace.

2. GLOBAL LANDSCAPE

Microplastic pollution is a ubiquitous environmental concern transcending geographical and political boundaries. Its pervasive nature has led to its detection in various environments ranging from the poles to the equator, from the ocean surface to the deepest marine trenches.

2.1 Marine environments

Distribution: Microplastics have been found in all the world's oceans, with significant concentrations observed in gyres, which are large systems of circulating ocean currents. Additionally, they are present in deep-sea sediments and Arctic ice (Tessnow-von Wysocki & Le Billon, 2019; R. J. Wright et al., 2020; S. L. Wright et al., 2013).
Impact: Marine life, including fish, seabirds, and marine mammals, often mistake microplastics for food, leading to ingestion and potential bioaccumulation. This not only threatens marine biodiversity but also poses risks to human health via seafood consumption.

2.2 Freshwater Environments:

Distribution: Lakes, rivers, and other freshwater systems are not immune to microplastic pollution. Microplastics have been detected in freshwater environments across the globe, highlighting the widespread nature of this kind of pollution. Evidence points to possible similarities between freshwater and marine systems in terms of the forces that carry microplastics (surface currents, for example), the frequency of microplastics (numerically abundant and ubiquitous), and possible chemical transfers through food chains (Eerkes-Medrano et al., 2015).

Impact: Similar to marine environments, the fauna in freshwater systems is at risk of microplastic ingestion, potentially impacting food chains and ecosystems. It is unknown if or how microplastics may impact terrestrial ecosystems and human health.

2.3 Terrestrial Environments:

Distribution: Soil is another significant sink for microplastics. Agricultural practices, wastewater treatment plants, and littering contribute to microplastic contamination in terrestrial environments. Sludge, mulching film, rain, and wastewater irrigation are the main sources of soil microplastics (He, D. *et al.*,2018).

Impact: The presence of microplastics in soil can affect soil biota, alter soil properties, and potentially lead to the contamination of food crops. The destination of microplastics on soil is not yet known.

2.4 Atmospheric dispersion:

Microplastics have been discovered in atmospheric fallout, indicating aerial transportation as a significant vector for global microplastic dispersion. This mode of transportation enables the widespread distribution of microplastics, even to remote and pristine areas.
Impact: Research shows that the intake of airborne microplastics by the human body may be higher than other exposure pathways, making it difficult to assess health damage precisely (Liao et al., 2021). More research is needed to determine the damage microplastics cause to the respiratory system correctly.

2.5 Regional variations:

Microplastic pollution levels vary significantly across different regions due to variations in plastic usage, waste management practices, and regulatory frameworks. Regions with inadequate waste management systems and high plastic consumption rates tend to exhibit higher levels of microplastic pollution. There is a relationship between microplastics and wastewater treatment plants, population density, and urban land use. Microplastic concentrations are impacted by the physical features of rainfall and water bodies; they also seem to be affected by runoff and resuspension during the wet season (Talbot and Chang, 2022).

Figure 2. Apparent deposition of textiles microber in CICATA Qro., passive collector, April 2023. Photo A.Sanchis-Castillo.

2.6 Global initiatives:

Various international bodies and agreements, such as the United Nations Environment Programme (UNEP) and the G7, have recognized the global threat posed by microplastic pollution and have initiated efforts to address and mitigate this crisis(UN env prog, 2023).(de Souza Machado et al., 2018)

ISSN: 2992-8338

This global overview showcases the ubiquitous nature of microplastic pollution, its pervasive infiltration into diverse environments, and its potential to inflict widespread ecological and human health ramifications. The varying regional levels of microplastic pollution underscore the necessity for a concerted international effort to mitigate this global environmental challenge(B. Chen et al., 2023).

3. MICROPLASTIC PRODUCTION AND ITS IMPLICATIONS

Microplastics, defined as plastic fragments less than 5mm in size, originate from various sources. They are either intentionally produced at this size for specific applications or result from the degradation of larger plastic items. The main sources of microplastics include cosmetics, clothing, food packaging, and industrial processes. The global production of plastics has been increasing exponentially, reaching nearly 350 million tons in 2017 and 359 million tons in 2018, contributing significantly to microplastic pollution (Hasan Anik et al., 2021)

3.1 Environmental implications

Aquatic Ecosystems: Microplastics have permeated aquatic ecosystems, impacting both marine and freshwater environments. They pose ingestion and entanglement risks to wildlife, and their accumulation in organisms can lead to bioaccumulation and biomagnification through the food chain (Roy et al., 2022)

Terrestrial Ecosystems: Similarly, terrestrial ecosystems are not spared from microplastic pollution. Microplastics can alter soil properties and affect soil organisms, which in turn may impact plant growth and soil health (Roy et al., 2022). The full impact of microplastics on soil ecosystems above and below ground remains unknown. However, research by Boots et al., 2019, shows that biomass and seed germination decline when exposed to plastics such as textile fibers and biodegradable polylactic acid microplastics (Fig.3). It is vital to know this mechanism thoroughly since human food security depends on it.

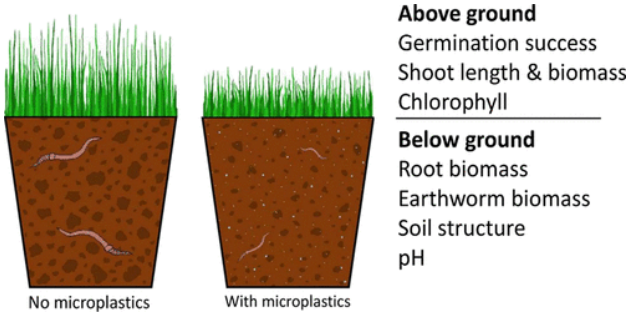


Figure 3. Research by Boots et al., 2019, shows that biomass and seed germination decline when exposed to microplastics.

Atmospheric Dispersion: Microplastics have been identified in atmospheric fallout, indicating that the air is also a significant vector for microplastic dispersion. Studies have found microplastics in indoor and outdoor air, showcasing their pervasive nature (Jarosz et al., 2022).

Impact on Ecosystems: Microplastics in the air can settle on land and water bodies, contributing to the overall microplastic pollution in these environments. Their potential to travel long distances through the atmosphere can contribute to microplastic pollution in remote and pristine areas.

Global Efforts to Understand and Mitigate Airborne Microplastics: Global efforts are underway to understand better the distribution, abundance, and implications of airborne microplastics. These efforts aim to develop strategies to mitigate airborne microplastic pollution and understand its interaction with other atmospheric pollutants.

3.2 Human Health Implications:

The chemicals associated with microplastics have been linked to severe health impacts. These include changes to human genetics, brain development, and respiration rates (UNEP, 2021). The smaller the plastic particles, the worse the potential can be. Indeed, there is evidence that smaller particles can reach the human placenta and other human tissues. (Lett et al., 2021; Ragusa et al., 2021; YANG et al., 2022)

3.3 Economic and societal implications

The economic costs associated with microplastic pollution are significant. They encompass expenses related to waste management, pollution control, and potential impacts on fisheries and tourism. The societal implications are equally profound as microplastic pollution challenges the sustainability of modern consumption and disposal practices.

3.4 Mitigation and Remediation

There are no effective countermeasures against microplastic pollution nowadays. However, there are ongoing efforts to mitigate microplastic pollution. These include improving waste management systems, promoting recycling, and exploring biodegradable alternatives to conventional plastics. Additionally, remediation pathways are being studied to address existing microplastic pollution (Roy et al., 2022)

The escalating production of plastics and subsequent proliferation of microplastics underscore a pressing global challenge. The implications of microplastic pollution are far-reaching, affecting not just ecological but also human health, economic, and societal dimensions (J. Chen et al., 2023). Also, international efforts have been made to regulate and standardize the use (UN env prog, 2023) and standardize microplastic analysis (ISO 24187, 2023).

4. POSSIBLE LONG-TERM CONSEQUENCES

Microplastic pollution is not just a contemporary issue but poses significant long-term threats that could persist for centuries due to the slow degradation rates of plastics. The enduring nature of microplastic pollution has the potential to inflict lasting damage on ecosystems, human health, and circular economy.

ISSN: 2992-8338

4.1 Ecosystems

Bioaccumulation and Biomagnification: Microplastics can accumulate within organisms and biomagnified up the food chain, potentially leading to toxic effects on wildlife and biodiversity loss.

Habitat Alteration: Microplastics can alter habitats by changing the physical and chemical properties of soil and water bodies, which can affect the organisms inhabiting these ecosystems.

Fig. 4 Microplastics entangled in living things. The extent to which microplastics are ingrained in marine animals' daily lives is demonstrated by a water sample taken off the coast of Hawaii. Photograph by David Liitschwager National Geographic Society.

4.2 Human Life Quality and Health:

Health Risks: The ingestion or inhalation of microplastics can pose health risks. Chemicals associated with microplastics may have toxic effects, and microplastics can also act as vectors for harmful pathogens.

Food and Water Safety: Microplastics in food and drinking water sources could compromise food and water safety, potentially leading to long-term health implications.

4.3 Circular Economy:

Recycling Challenges: The presence of microplastics can complicate recycling processes, reducing the quality and economic value of recycled materials.

Resource Recovery: Microplastic pollution undermines the principles of a circular economy by contributing to the loss of valuable materials and resources, which could otherwise be recovered and reused.

The potential long-term consequences of microplastic pollution underscore the need for urgent and effective measures to mitigate microplastic pollution and promote sustainable practices. Understanding and addressing the long-term implications of microplastic pollution is crucial for protecting ecosystems, ensuring human health and well-being, and advancing towards a more circular and sustainable economy.

6. MICROPLASTIC POLLUTION PANORAMA IN MEXICO

Microplastic pollution has emerged as a salient environmental issue in Mexico, mirroring the global concern surrounding these pervasive pollutants. The infiltration of microplastics into various environmental compartments in the region reveals a multifaceted problem with potential long-term implications. Here's a deeper dive into the nuances of microplastic pollution across different domains in Mexico:

6.1 Groundwater Pollution

In a groundbreaking study published in 2023, researchers explored the extent of microplastic pollution in a coastal aquifer in Northwest Mexico, marking the first insight into microplastic pollution in groundwater within Latin America. The study accentuates the risks associated with microplastic contamination in groundwater, a vital source of drinking water, thereby raising concerns over potential health risks emanating from microplastic exposure through drinking water (Alvarado-Zambrano et al., 2023).

6.2 Coastal Pollution

Coastal regions in Mexico have not been spared from the scourge of microplastic pollution. A comprehensive study conducted across 33 beaches spanning five marine regions in the country revealed a disparate concentration of microplastics. The microplastic concentration varied significantly, ranging from 31.7 to 545.8 microplastics per meter squared. Notably, the Gulf of California exhibited a higher mean concentration of microplastics, particularly on urban-overdeveloped beaches. The study also underscored an upsurge in microplastic concentration following extreme weather events, hinting at the potential exacerbation of microplastic pollution under changing climatic conditions (Alvarez-Zeferino et al., 2020).

Fig. 5 Microplastics coastal pollution

6.3 Atmospheric Dispersion

The percolation of microplastics into the atmospheric domain has been evidenced in Mexico City, one of the most populous urban centers in the country. This discovery underscores the extensive dispersion of microplastics, extending beyond aquatic and terrestrial realms into urban atmospheres. The

ISSN: 2992-8338

atmospheric dispersion of microplastics is particularly concerning, given its potential to contribute to microplastic pollution in remote and pristine areas, further highlighting the transboundary nature of this environmental menace (Shruti et al., 2022).

6.4 Marine Pollution.

On a broader marine scale, the Gulf of Mexico is recognized as the world's most significant gulf. Also, with a higher concentration, the Gulf of California faces the challenge of microplastic pollution. Research has elucidated the presence of microplastics in both sediments and water within the gulf, underscoring the pervasive nature of microplastic pollution in marine ecosystems (Alvarez-Zeferino et al., 2020). The marine microplastic pollution not only poses a threat to marine biodiversity but also raises concerns over human health risks, mainly through the consumption of contaminated seafood (Hohn et al., 2020)

6. CONCLUSIONS OPPORTUNITIES AND CHALLENGES

The pervasive menace of microplastic pollution unveils a critical challenge of our modern era, encapsulating a complex interplay between environmental stewardship, public health, and sustainable economic growth. The ubiquitous distribution of microplastics across diverse ecosystems—marine, freshwater, terrestrial, and atmospheric—demands immediate and sustained interventions. The potential long-term ramifications on ecosystems, human health, and the circular economy further accentuate the imperative for robust scientific inquiry, informed policymaking, and heightened public awareness. Amidst these challenges, there lies a silver lining encapsulated in opportunities. The advancement in material science propels the development of biodegradable and environmentally benign alternatives to conventional plastics. Concurrently, innovations in recycling technologies are paving the way for enhanced resource recovery, aligning with the ethos of a circular economy. The regulatory landscape, too, holds promise, where strengthened regulations and international collaborations can significantly curb microplastic pollution. However, the path forward is laden with hurdles, notably in fostering public awareness, instigating behavioral change, and fostering global cooperative endeavors to mitigate this transboundary issue. The journey towards alleviating microplastic pollution and veering towards a sustainable trajectory is a collective endeavor, necessitating a synthesis of scientific innovation, robust regulatory frameworks, and global solidarity. Through a concerted effort, the challenge of microplastic pollution can be transformed into an opportunity for fostering a sustainable and resilient future.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thanks to I.P.N for funding the research, under the project S.I.P 20231604 “Desarrollo de un sistema de captura de microplásticos y otros contaminantes sólidos suspendidos en el aire”

REFERENCES

Alvarado-Zambrano, D., Rivera-Hernández, J. R., & Green-Ruiz, C. (2023). First insight into microplastic groundwater pollution in Latin America: the case of a coastal aquifer in Northwest Mexico. Environmental Science and Pollution Research, 30(29), 73600–73611. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27461-9

Alvarez-Zeferino, J. C., Ojeda-Benítez, S., Cruz-Salas, A. A., Martínez-Salvador, C., & Vázquez-Morillas, A. (2020). Microplastics in Mexican beaches. Resources, Conservation and Recycling, 155. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104633

Boots, B., Russell, C. W., & Green, D. S. (2019). Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground. Environmental Science & Technology, 53(19), 11496–11506. doi:10.1021/acs.est.9b03304

Chen, B., Zhang, Z., Wang, T., Hu, H., Qin, G., Lu, T., Hong, W., Hu, J., Penuelas, J., & Qian, H. (2023). Global distribution of marine microplastics and potential for biodegradation. Journal of Hazardous Materials, 451. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131198

Chen, J., Chen, H., Smith, T. F., & Rangel-Buitrago, N. (2023). Analyzing the impact and evolution of ocean & coastal management: 30 years in retrospect. In Ocean and Coastal Management (Vol. 242). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106697

de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. In Global Change Biology (Vol. 24, Issue 4, pp. 1405–1416). Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1111/gcb.14020

Eerkes-Medrano, D., Thompson, R.C. and Aldridge, D.C. (2015) 'Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs', Water Research, 75, pp. 63–82. doi:10.1016/j.watres.2015.02.012.

Fu, W., Min, J., Jiang, W., Li, Y., & Zhang, W. (2020). Separation, characterization and identification of microplastics and nanoplastics in the environment. Science of the Total Environment, 721. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137561

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. https://www.science.org

Hasan Anik, A., Hossain, S., Alam, M., Binte Sultan, M., Hasnine, M. T., & Rahman, M. M. (2021). Microplastics pollution: A comprehensive review on the sources, fates, effects, and potential remediation. In Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management (Vol. 16). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100530

Hohn, S., Acevedo-Trejos, E., Abrams, J. F., Fulgencio de Moura, J., Spranz, R., & Merico, A. (2020). The long-

ISSN: 2992-8338

term legacy of plastic mass production. Science of The Total Environment, 746, 141115. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141115

ISO 24187. (2023). Principles for the analysis of microplastics present in the environment Principes d'analyse des microplastiques présents dans l'environnement.

Jarosz, K., Janus, R., Wądrzyk, M., Wilczyńska-Michalik, W., Natkański, P., & Michalik, M. (2022). Airborne Microplastic in the Atmospheric Deposition and How to Identify and Quantify the Threat: Semi-Quantitative Approach Based on Kraków Case Study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(19). https://doi.org/10.3390/ijerph191912252

Lett, Z., Hall, A., Skidmore, S., & Alves, N. J. (2021). Environmental microplastic and nanoplastic: Exposure routes and effects on coagulation and the cardiovascular system. In Environmental Pollution (Vol. 291). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118190

Liao, Z., Ji, X., Ma, Y., Lv, B., Huang, W., Zhu, X., … Shang, X. (2021). Airborne microplastics in indoor and outdoor environments of a coastal city in eastern China. Journal of Hazardous Materials, 417, 126007. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.126007

Microplastics. (2023). Retrieved from https://education.nationalgeographic.org/resource/microplastics/

Philippe Chalmin (2019) The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock. Field Actions Science Reports [Online], Special Issue 19: http://journals.openedition.org/factsreports/5071

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. In Environment International (Vol. 146). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274

Roy, P., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2022). Microplastics in ecosystems: their implications and mitigation pathways. Environmental Science: Advances, 1(1), 9–29. https://doi.org/10.1039/d1va00012h

Shruti, V. C., Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., & Martínez, I. E. (2022). Occurrence and characteristics of atmospheric microplastics in Mexico City. Science of the Total Environment, 847. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157601

Talbot, R. and Chang, H. (2022) 'Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations', Environmental Pollution, 292, p. 118393. doi:10.1016/j.envpol.2021.118393.

Tessnow-von Wysocki, I., & Le Billon, P. (2019). Plastics at sea: Treaty design for a global solution to marine plastic pollution. Environmental Science and Policy, 100, 94–104. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.06.005

UN env prog. (2023). Legal Limits on Single-Use Plastics and Microplastics: A Global Review of National Laws and Regulations.

UNEP. (2021). FROM POLLUTION TO SOLUTION A GLOBAL ASSESSMENT OF MARINE LITTER AND PLASTIC POLLUTION. https://www.unep.org/

Wright, R. J., Erni-Cassola, G., Zadjelovic, V., Latva, M., & Christie-Oleza, J. A. (2020). Marine Plastic Debris: A New Surface for Microbial Colonization. Environmental Science and Technology, 54(19), 11657–11672. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02305

Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. In Environmental pollution (Barking, Essex : 1987) (Vol. 178, pp. 483–492). https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031

YANG, Z. Sen, BAI, Y. L., JIN, C. H., NA, J., ZHANG, R., GAO, Y., PAN, G. W., YAN, L. J., & SUN, W. (2022). Evidence on Invasion of Blood, Adipose Tissues, Nervous System and Reproductive System of Mice After a Single Oral Exposure: Nanoplastics versus Microplastics. Biomedical and Environmental Sciences, 35(11), 1025–1037. https://doi.org/10.3967/bes2022.131

ISSN: 2992-8338

Study of an Imidazoline Derived from Rice Bran Oil as Corrosion Inhibitor for SAE 62 Bronze in Contact with Acid Rain Environment

***Ian Didiere Vázquez Aguirre*[*,**], *Álvaro Torres Islas*[*], *Edna Vázquez Vélez*[**], *Horacio Martínez Valencia*[**], *Adrian del Pozo Mares*[***], *Ave María Cotero Villegas*[*]**

[*] *Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos e Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa 62209, Cuernavaca, Morelos, México.*

[**] *Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma del Estado de México. Av. Universidad s/n, Col. Chamilpa, C.P. 62210, Cuernavaca Morelos.*

[***] *Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mujica S/N, Edificio U, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán. México*

Abstract: The efficacy of the environmentally friendly corrosion inhibitor hydroxyethyl-fatty imidazoline, derived from the oil in rice bran polish, was investigated to prevent corrosion of SAE-62 bronze in a simulated acidic rain solution. Electrochemical impedance spectroscopy (EIE) and corrosion potential-pH (CPP) results indicated a significant reduction in corrosion in the presence of the inhibitor, with greater effectiveness at higher concentrations and more prolonged exposures. Experimental data from electrochemical studies were fitted to the Langmuir isotherm, confirming that the inhibitor's adsorption mechanism is chemisorption. This is attributed to the fatty imidazoline being a compound with heteroatoms and unsaturated chains that adsorb onto the bronze surface. Furthermore, the imidazoline operates as a mixed-type inhibitor. The highest corrosion inhibition efficiency for bronze in acidic rain was 92% at a concentration of 50 ppm of the corrosion inhibitor.

Keywords: Corrosion inhibitor, Rice Bran Oil, Imidazoline, SAE 62 Bronze, Acid Rain.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión es un proceso natural que deteriora materiales metálicos al liberar energía y hacer que los metales regresen a su estado original. En México, a pesar de la falta de estudios específicos, se estima que las pérdidas económicas debidas a la corrosión representan aproximadamente el 3.5% del Producto Interno Bruto (PIB), un porcentaje similar al de países industrializados como Australia, Gran Bretaña y Japón, debido a la creciente industrialización del país. El bronce, al igual que otros metales, se ve afectado por la corrosión debido a cambios en la atmósfera causados por gases de efecto invernadero y la consiguiente lluvia ácida. A pesar de que el uso del bronce es esencial en la vida cotidiana y en el progreso humano, la corrosión sigue siendo un desafío constante. Los inhibidores de corrosión han sido una solución, pero su elección depende del metal, el entorno y las condiciones operativas. No obstante, muchos de estos inhibidores convencionales, como el Benzotriazol tienen impactos ambientales y en la salud humana. Las regulaciones ambientales actuales, como las de la EPA en los Estados Unidos y la Directiva de la Unión Europea, están impulsando la búsqueda de inhibidores de corrosión sostenibles y biodegradables. Algunas investigaciones han reportado el uso exitoso de sustancias de origen natural para inhibir la corrosión de metales en medio ácido y alcalino, es por ello por lo que se incentiva a estudiar la pulidura de Arroz *O. Sativa* por su contenido de ácidos grasos que sirven como materia prima en la síntesis de un inhibidor de corrosión como la imidazolina grasa. (Tejeda, et al., 2014) (Galvaez, et al., 2017) En este contexto se busca resolver los problemas de corrosión en el cobre y sus aleaciones mediante el uso de inhibidores, que comúnmente son costosos, tóxicos y perjudiciales para el medio ambiente. Las nuevas regulaciones ambientales impulsan la búsqueda de inhibidores sostenibles y biodegradables. En este contexto, se propone la síntesis de un inhibidor a partir de residuos agroindustriales, específicamente la pulidura de arroz O. sativa, para proporcionarle un valor añadido.

Este trabajo evalúa la resistencia a la corrosión del Bronce SAE-62 en lluvia ácida simulada con pH 4.16, que afecta a la zona centro de México (Región 9). Se investiga la influencia de un inhibidor ecológico en diferentes concentraciones (25, 50 y 100 ppm). Además, se busca la síntesis de un inhibidor a partir de la pulidura de arroz *O. sativa*, un subproducto agroindustrial. La composición química se analiza mediante espectroscopia Raman.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Proceso de Secado de la Muestra de Arroz

La pulidura de arroz (PA) se recolectó poco después de la molienda y se pesó. Luego, se sometió a un secado en horno a 70°C durante 1 hora, lo que redujo su peso en 6 gramos en comparación con el inicial. Para garantizar la eliminación total de la humedad, la muestra se secó durante 24 horas adicionales, controlando el peso para asegurarse de que

ISSN: 2992-8338

alcanzara un estado constante. Finalmente, se determinó que la muestra contenía un 12.87% de humedad.

2.2 Extracción del Aceite Crudo de la pulidura de arroz

Se extrajo el aceite de la pulidura de arroz utilizando el método Soxhlet con Hexano como disolvente. Se optó por Hexano debido a su disponibilidad, eficacia en la extracción de aceite y su compatibilidad con el proceso Soxhlet. A lo largo del tiempo, el método Soxhlet ha sido ampliamente adoptado como el estándar para la extracción de muestras sólidas y es utilizado como referencia por organizaciones como la EPA y la FDA en diversos procedimientos oficiales para la extracción continua de sólidos.

2.3 Relación optima de Peso de Pulidura de Arroz y Volumen de Disolvente para Extracción

Para determinar la relación óptima entre el peso de la pulidura de arroz (PA) y el volumen del disolvente para la extracción, se consultó la literatura (Dorantes, et al., 2018) y se inició con una relación de 1:6. También se evaluaron relaciones de 1:8, 1:10 y 1:12 g/ml. La eficiencia se basó en la relación entre la masa de aceite obtenida experimentalmente y el disolvente, a una temperatura de 85°C, agitación de 360 rpm y el tipo de disolvente.
Los resultados muestran que la relación 1:8 en una extracción de 3 horas alcanza una eficiencia máxima del 19.16%. Relaciones más altas no mejoran la extracción. Asimismo, se calculó el error porcentual relativo utilizando el método de Soxhlet y el promedio de todas las extracciones.

2.4 Síntesis del Inhibidor

El inhibidor de corrosión, una Imidazolina, se sintetizó mediante una aminólisis directa entre el triglicérido del APA obtenido con el método Soxhlet y la aminoetiletanolamina (AEEA) como se observa en la Figura 1. La reacción se realizó con una relación molar de 1:3 entre APA y AEEA, sin disolvente, a 140 °C durante 2 horas con agitación magnética. La formación de amidas de ácidos grasos se confirmó mediante cromatografía de capa fina. La reacción de ciclización para obtener imidazolinas de ácidos grasos se llevó a cabo a 70 mmHg y 140 °C. Después de 4 horas, se consideró que la reacción estaba completa, resultando en una relación de 2:1 entre imidazolinas y amidas de ácidos grasos. El producto crudo se analizó mediante espectroscopia Raman.

2.5 Caracterización Química del Aceite Mediante Espectroscopia Raman

La caracterización química del aceite se realizó mediante espectroscopía Raman. En la Figura 2, se muestra el espectro del aceite extraído de la pulidura de arroz. La señal a 1759 cm^{-1} corresponde al estiramiento simétrico del grupo funcional éster del triglicérido (carbonilo C=O). Las señales a 2905 cm^{-1} y 2845 cm^{-1} representan los estiramientos asimétrico y simétrico de los enlaces C-H en los grupos $-CH_3$ y $-CH_2$, respectivamente, mientras que la señal a 1432 cm^{-1} corresponde a la deformación de estos grupos. La intensa señal a 1660 cm^{-1} se atribuye al estiramiento vibracional simétrico del doble enlace -C=C en las insaturaciones de las cadenas alquílicas de los ácidos grasos. Por último, la señal característica del estiramiento vibracional del enlace -C-O-C se encuentra a 1200 cm^{-1}.

2.5 Caracterización Espectral del Inhibidor

La Figura 3 muestra la caracterización espectral de la mezcla de imidazolinas y amidas de ácidos grasos derivada del APA. En esta representación, se destacan las siguientes características clave: una pequeña banda a 3093 cm^{-1} que corresponde a la vibración simétrica del enlace -O-H; una señal a 1659 cm^{-1} que refleja el carbonilo (C=O) del grupo amida, que es el precursor de la imidazolina; la formación de la imidazolina se evidencia mediante una señal a 1575 cm^{-1}, que representa el estiramiento simétrico del enlace C=N en el anillo imidazolínico. Además, en el rango de 2800 a 2900 cm^{-1}, se observan señales de vibración del enlace C-H de los grupos CH_2 y CH_3. También se puede apreciar la señal de deformación del enlace C-H a 1438 cm^{-1}.

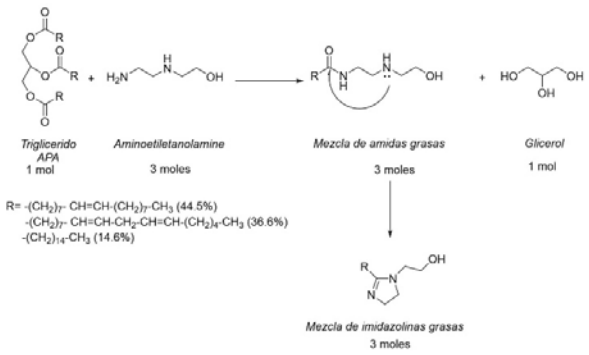


Figura 1 Síntesis de la mezcla de imidazolinas derivadas del aceite de pulidura de arroz.

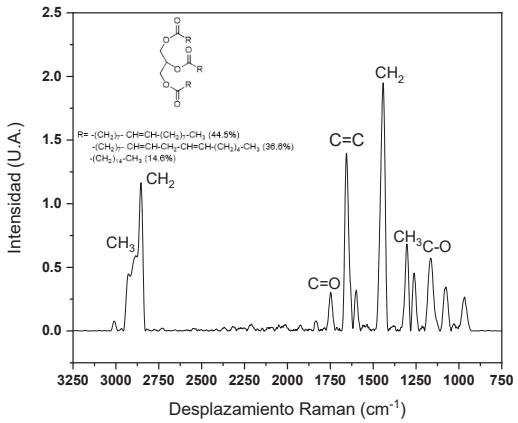


Figura 2 Espectro Raman de la mezcla de amidas grasas e imidazolinas grasas derivadas de APA.

ISSN: 2992-8338

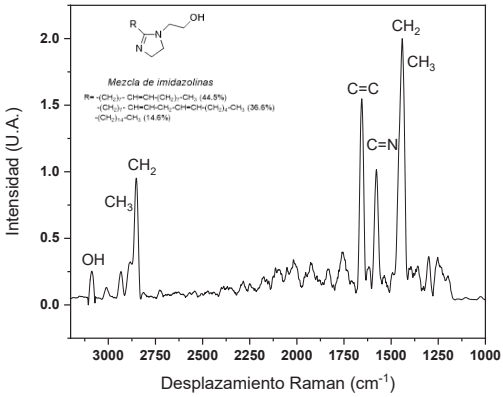


Figura 3 Espectro Raman de la mezcla de amidas grasas e imidazolinas grasas derivadas de APA.

2.6 Preparación de la Solución Electrolítica

Se utilizó un electrolito en forma de solución de lluvia ácida simulada, la cual fue obtenida a partir de un estudio sobre la composición química de la lluvia en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México durante el período 2003-2014 (Echeverría, et al., 2019). En dicho estudio, se determinaron los límites de detección para iones específicos, que fueron los siguientes: 2.29, 1.77, 2.26, 2.50, 3.29, 1.79, 2.22, y 1.74 para SO_4^{2-}, NO_3^-, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, $NH^{4+,}$ y Na^+, respectivamente. La composición química detallada de la lluvia ácida simulada preparada se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Composición química de la solución de lluvia ácida simulada. (g L^{-1}).

Disociación	Peso molecular (PM)	Catión # eq.	mg/L empleados
$Ca^+ + Cl_2^-$	111.0	2	0.2641
$Mg^+ + SO_4^-$	120.4	2	0.0658
NH_4^++NO3$^-$	80.0	1	0.3194
K^++Cl^-	74.6	1	0.0746

2.7 Preparación del Inhibidor para las pruebas Electroquímicas

Se preparó una solución madre de 5000 ppm del inhibidor para las diversas concentraciones utilizadas. Esto se logró al diluir 0.25 gramos del inhibidor sintetizado en 50 ml de propanol, con el objetivo de trabajar con volúmenes de agua de lluvia ácida de 50 ml en las pruebas electroquímicas. Los cálculos necesarios para las otras concentraciones empleadas se llevaron a cabo de forma análoga.

2.8 Material Empleado para las Prueba Electroquímicas

Se utilizó bronce SAE-62, un material automotriz, para crear probetas de 0.5 cm^2. Estas probetas se recortaron y se encapsularon en resina epóxica. Luego, se sometieron a un proceso de lijado con distintos grados de papel de lija, que variaron desde 120 hasta 600, para lograr una superficie uniforme. Después las probetas se limpiaron a fondo con un lavador ultrasónico de alta frecuencia y se secaron.

2.9 Montaje y Parámetros de la Celda Electroquímica

Se realizaron estudios que emplearon técnicas electroquímicas, incluyendo tanto la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) como las curvas de polarización potenciodinámica (CPP). Para estas pruebas, se utilizó una celda de vidrio de tres electrodos con un calomelano saturado como electrodo de referencia, una varilla de grafito como electrodo auxiliar, y las probetas de Bronce SAE-62 encapsuladas previamente como electrodo de trabajo. Se llevaron a cabo pruebas electroquímicas con Bronce SAE-62 en agua de lluvia ácida, tanto en ausencia como en presencia del inhibidor de corrosión sintetizado a partir del APA y el AEEA. Los ensayos se realizaron en concentraciones de 0, 10, 25, 50 y 100 ppm, y se llevaron a cabo a temperatura ambiente durante un período de 24 horas.

Para las pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), se calibró el potenciostato AC Gill siguiendo la norma ASTM G106-89. Los parámetros de la prueba EIS incluyeron una señal de corriente alterna con una amplitud de 50 mV en un potencial de circuito abierto, en un rango de frecuencia de 30,000 a 0,01 Hz. El módulo de impedancia |Z| se utilizó para observar el comportamiento de la corrosión.

Las pruebas de curvas de polarización potenciodinámica (CPP) se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM G5-94, con un barrido de velocidad de 60 mV/min. Los valores del potencial de corrosión (Ecorr) y la densidad de corriente de corrosión (Icorr) se emplearon en el análisis del comportamiento de la corrosión. En la Figura 4, se muestra el arreglo de la celda electroquímica antes de iniciar una prueba, donde se observa el montaje de los electrodos y la disposición de las probetas de Bronce SAE-62.

Figura 4 Arreglo de la Celda Electroquímica para las Pruebas de Corrosión.

ISSN: 2992-8338

3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados de la EIS del Bronce SAE 62 en Contacto con el Medio de Lluvia Ácida en Presencia y Ausencia del Inhibidor en las Diferentes Concentraciones en el Tiempo

3.1.2 Diagramas de Nyquist

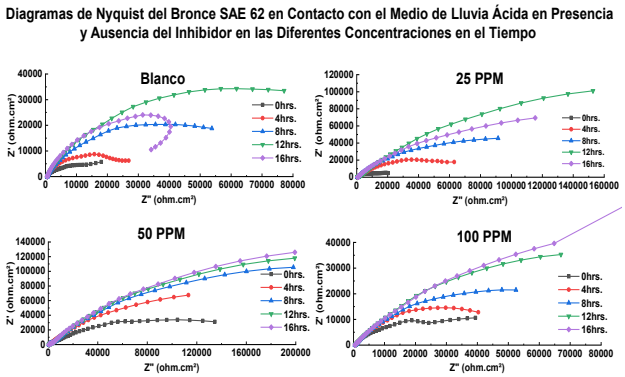


Figura 5 Diagramas de Nyquist del Bronce SAE 62 en Contacto con el Medio de Lluvia Ácida en Presencia y Ausencia del Inhibidor en las Diferentes Concentraciones en el Tiempo

Los diagramas de Nyquist, generados a partir de los resultados de la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE), se presentan en la Figura 5. Estos diagramas proporcionan información sobre el efecto de la ausencia del inhibidor y las diferentes concentraciones de inhibidor utilizadas. En los gráficos de Nyquist, se observa que los semicírculos presentan valores del módulo de impedancia |Z| que varían desde 420 hasta 2.0×10^5 ohmios [Ω]. En el gráfico sin inhibidor, se puede observar un semicírculo capacitivo deprimido en valores de frecuencia altos e intermedios a las 0 y 4 horas de inmersión, seguido por lo que parece un segundo semicírculo sin terminar. Estos fenómenos están relacionados con el mecanismo de transferencia de carga. Este comportamiento también se observa en concentración de 25 ppm a las 0 horas de inmersión, así como en 100 ppm a las 0 y 16 horas de inmersión. Fenómenos similares han sido reportados en estudios anteriores, como el trabajo de Tasiÿ et al., quienes utilizaron ibuprofeno como inhibidor de corrosión para el cobre en lluvia ácida sintética, y el estudio de González et al., que utilizó extracto de Thymus vulgaris como inhibidor del bronce en lluvia ácida (Rodriguez, et al., 2022). En el resto de las horas de inmersión en las diferentes concentraciones utilizadas, se evidencia un aumento en el diámetro de estos semicírculos al agregar el inhibidor, aunque la formación incompleta a bajas frecuencias se debe a las limitaciones del equipo en las lecturas. Estos semicírculos deprimidos, a menudo asociados con la dispersión de frecuencia, se originan debido a la no uniformidad o rugosidad de la superficie. Además, el aumento en el diámetro del semicírculo generalmente indica un aumento en la resistencia de transferencia de carga debido a la formación de una capa protectora de productos de corrosión y, por otro lado, al uso del inhibidor mediante el proceso de adsorción en la superficie del metal, lo que lo aísla de su entorno (Salinas Solano, et al., 2018)

Por otro lado, en ausencia del inhibidor, a las 16 horas de inmersión, se produce un proceso adicional que afecta al semicírculo de manera distinta a la transferencia de carga. Este proceso separado, conocido como efecto inductivo, ocurre debido a un cambio repentino en la densidad de corriente de corrosión, lo que induce una disminución en la resistencia de transferencia de carga. Este efecto surge debido a la adsorción/desorción de especies (Salinas Solano, et al., 2018). Es notable que este fenómeno no se manifiesta en ninguna concentración empleada del inhibidor. Además, se observa que desde las 0 hasta las 16 horas de inmersión, la concentración de 50 ppm de inhibidor muestra el mayor diámetro de los semicírculos. Por debajo de una concentración de inhibidor de 50 ppm, se produce una cobertura superficial insuficiente que dificulta la difusión del electrolito, lo que provoca la persistencia de sitios no protegidos. Sin embargo, la concentración de 100 ppm muestra una disminución similar en el diámetro del semicírculo, similar al caso del blanco. Esto puede atribuirse a fuerzas de repulsión electrostática entre moléculas adsorbidas, lo que provoca la desorción y la exposición de sitios desprotegidos (Díaz, et al., 2017) (Dorantes, et al., 2018) (Salinas Solano, et al., 2018).

3.1.3 Diagramas módulo de Impedancia y Ángulo de Fase

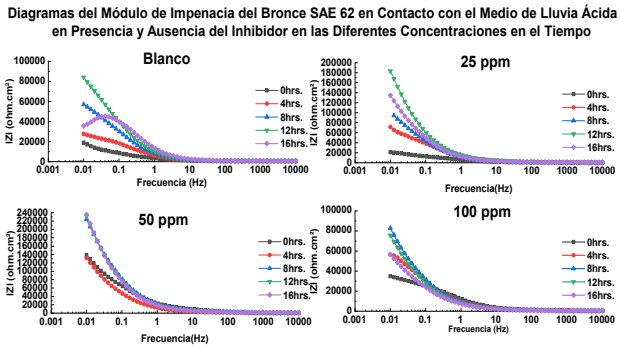


Figura 6 Diagramas del Módulo de Impedancia del Bronce SAE 62 en Contacto con el Medio de Lluvia Ácida en Presencia y Ausencia del Inhibidor en las Diferentes Concentraciones en el Tiempo.

En la Figura 6, se puede apreciar claramente la relación entre el aumento del módulo |Z| y el incremento en la concentración del inhibidor. A medida que aumenta la concentración del inhibidor, el módulo |Z| alcanza su valor más alto a una concentración de 50 ppm, debido a la inhibición proporcionada por este compuesto. Además, se observa la presencia de una constante de tiempo RC que se manifiesta en altas frecuencias. Esta constante de tiempo se deriva del proceso de carga y descarga del condensador y, en última instancia, determina la pendiente de la curva. Una constante de tiempo grande indica un proceso de carga o descarga más lento, lo que resulta en una disminución de la corriente debido al aumento de la resistencia del circuito. En este contexto, la pendiente negativa observada a las 16 horas en el caso sin el uso del inhibidor en la muestra de Bronce confirma que la película de productos de corrosión se desprende de la superficie metálica, permitiendo que los iones en la solución vuelvan a entrar en contacto con el metal. Esta misma razón es la causa de la pendiente negativa y el aumento en la corriente, como consecuencia de la disminución

ISSN: 2992-8338

de la resistencia del circuito. Además, el módulo |Z| revela la presencia de dos pendientes una vez que se añade el inhibidor. La primera de ellas se manifiesta en el rango de frecuencias altas a medias y está asociada con dos constantes de tiempo. La primera constante se observa en la región de alta frecuencia debido a la presencia del inhibidor en la superficie del metal. La segunda constante de tiempo se hace evidente en la región de frecuencias intermedias, relacionada con la respuesta capacitiva del Bronce SAE 62. Por otro lado, se observa un aumento en el módulo |Z| a bajas frecuencias al agregar el inhibidor. Este incremento se atribuye al aumento en la resistencia a la transferencia de carga del Bronce SAE 62, lo que resulta en una disminución en la velocidad de corrosión. (Sotelo, et al., 2023; Rodriguez, et al., 2022) (Rodriguez, et al., 2022).

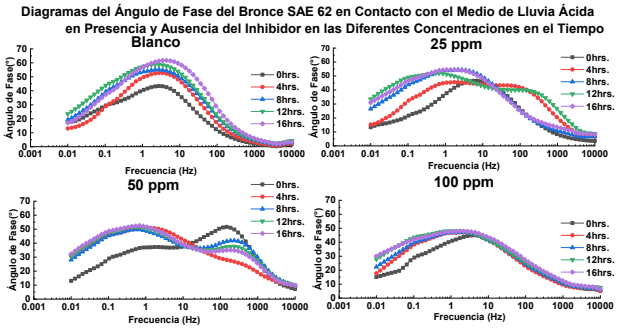


Figura 7 Diagramas de Ángulo de Fase del Bronce SAE 62 en Contacto con el Medio de Lluvia Ácida en Presencia y Ausencia del Inhibidor en las Diferentes Concentraciones en el Tiempo.

El gráfico del ángulo de fase resulta fundamental para observar la formación de capas de productos de corrosión o películas de inhibidores en la superficie del metal. En la Figura 7 se presentan las gráficas correspondientes a la ausencia y presencia de diferentes concentraciones del inhibidor en función del tiempo, a temperatura ambiente (25°C). Se determinó que la concentración óptima es de 50 ppm. En el gráfico, se evidencian dos constantes de tiempo desde el inicio hasta las 24 horas de inmersión. La primera constante de tiempo, aunque no está completamente definida, se encuentra en la zona de altas frecuencias y está asociada con la adsorción y formación de una película inhibidora, mostrando un ángulo de 26° que aumenta hasta 52°. La segunda constante de tiempo, ubicada entre frecuencias intermedias y bajas (10-0.01 Hz), presenta un ángulo de 35° que se incrementa hasta 56° y está asociada a la formación de CuO y Cu_2O (Sotelo, et al., 2023). Este comportamiento también se observó en la concentración de 25 ppm a las 4 y 12 horas de inmersión. Aunque inicialmente se observa un ángulo mayor para el Blanco en comparación con el uso del inhibidor a 50 ppm, después de 16 horas de inmersión, el ángulo de fase del Blanco disminuye, lo que induce a una mayor transferencia de carga en comparación con el ángulo de fase a la concentración de 50 ppm. En este sentido, al principio, a pesar de la formación de una película de productos de corrosión en el Bronce SAE 62 en el Blanco, esta no es homogénea, y los productos de corrosión continúan diluyéndose. Por otro lado, la película que se forma debido a la sinergia entre los productos de corrosión y el inhibidor se vuelve más estable, disminuyendo así la transferencia de carga (Salinas Solano, et al., 2018) (Rodriguez, et al., 2022) (Sotelo, et al., 2023). Se ha señalado que un valor de ángulo cercano a 90° indica que la película inhibidora tiene características protectoras, pero si el valor está alrededor de 50°, puede ocurrir un proceso de corrosión de control mixto (difusión y transferencia de carga) (Sotelo, et al., 2023).Basándonos en lo mencionado anteriormente, en los diagramas de Nyquist se presentaron para las horas iniciales de inmersión la formación de dos semicírculos asociados a las dos constantes de tiempo en los gráficos de ángulo de fase, tanto en el blanco como en las concentraciones de inhibidor de 0, 25 y 100 ppm.

3.1.4 Resultados de CPP del Bronce SAE 62 en contacto con el medio de lluvia ácida en ausencia y presencia del inhibidor y variación de concentraciones

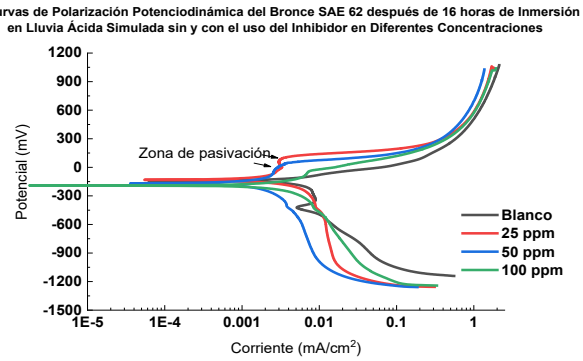


Figura 8 Curvas de Polarización Potenciodinámica del Bronce SAE 62 después de 16 horas de Inmersión de Inmersión en Lluvia Ácida Simulada sin y con el uso del Inhibidor en Diferentes Concentraciones.

La Figura 8 muestra las curvas de polarización potenciodinámica del Bronce SAE 62 en contacto con la atmósfera de agua de lluvia ácida para diferentes concentraciones del inhibidor. Previo a la polarización potenciodinámica, se permitió que el electrodo de trabajo se estabilizara en el electrolito durante 16 horas de inmersión, con el objetivo de lograr una máxima cobertura superficial del inhibidor en la superficie del electrodo de trabajo (Dorantes et al., 2018).

El gráfico revela que la curva de polarización sin inhibidor (Blanco) muestra un comportamiento activo en la rama anódica, asociado a la rápida disolución de los productos de corrosión que protegen la superficie del metal de las especies corrosivas (Salinas Solano et al., 2018). El valor de Ecorr observado en la concentración de 25 ppm es el más noble en comparación con el Blanco y las demás concentraciones, pero el Blanco exhibe la mayor tasa de corrosión, indicando una mayor densidad de corrosión en todas las concentraciones estudiadas. La adición del inhibidor aumenta la pendiente de las ramas anódicas y disminuye los valores de Icorr, lo que refleja el efecto protector del inhibidor, formando una película protectora en la superficie del metal. Las curvas de polarización también muestran que los valores de Ecorr del Bronce SAE 62 con inhibidor se desplazan hacia posiciones más activas en comparación con el Bronce SAE 62 sin

ISSN: 2992-8338

inhibidor, sin embargo, se mantiene en un rango de ± 50mV respecto al Blanco, lo que indica que es un inhibidor de tipo mixto (Salinas Solano et al., 2018). En la Tabla 2, se observa una disminución de los valores del potencial de corrosión (Ecorr) hacia valores más activos con la adición del inhibidor. La concentración de 100 ppm muestra el valor más negativo (-190.23mV), y la curva de polarización del Blanco presenta la densidad de corrosión más alta (6.91 μA/cm^2). En particular, un exceso de inhibidor puede provocar sitios desprotegidos en la superficie metálica debido a una eficiente repulsión electrostática, lo que aumenta los valores de Icorr. Por otro lado, el inhibidor adsorbido en la superficie del metal disminuye los valores de Ecorr, lo que bloquea los sitios activos y está relacionado con cambios en las reacciones anódicas y catódicas (Díaz et al., 2017; Dorantes et al., 2017; del aumento en los voltajes mencionado anteriormente, la corriente se mantiene constante en la región anódica, lo que se conoce como la zona de pasivación (Cruz et al., 2012). Este fenómeno se observó principalmente en la concentración de 50 ppm del inhibidor. Finalmente se determinó la eficiencia de inhibición (EI %) donde para la concentración de 50 ppm fue del 92% (Tabla 2). Los investigadores señalan que, para que un inhibidor sea considerado eficiente, debe demostrar una eficiencia mínima del 90% y ser capaz de reducir la corriente de corrosión (Icorr) en al menos un orden de magnitud.

Tabla 2 Parámetros Electroquímicos Obtenidos a Partir de las Curvas de Polarización del Bronce SAE 62 en Contacto con Medio de lluvia Ácida en Diferentes Concentraciones Empleadas del Inhibidor.

Concentración del Inhibidor (ppm)	Ecorr (mV)	Icorr (μA/cm^2)	EI (%)
Blanco	-140.69	6.91	0
25	-131.96	1.76	75
50	-168.86	0.57	92
100	-190.23	2.08	70

3.2 Isoterma de Adsorción

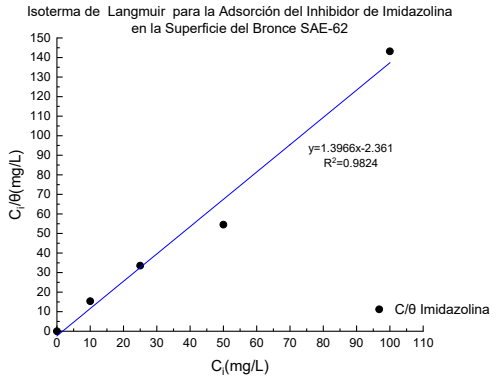


Figura 9 Isoterma de Langmuir para la Adsorción del Inhibidor de Imidazolina.

A partir de los resultados de eficiencia de inhibición en el Bronce SAE 62, se ajustaron diferentes isotermas de adsorción. La inhibición de corrosión por compuestos orgánicos involucra adsorción en la superficie metálica y formación de complejos insolubles. La isoterma de adsorción que mejor se ajusto fue la de Langmuir (Figura 9) para ajustar los valores de cobertura de superficie, se interpreta que la dinámica del proceso de inhibición ocurre a través de la formación de enlaces covalentes coordinados como consecuencia de la transferencia de carga de las moléculas hacia la superficie metálica, lo que se ha interpretado como una adsorción química (o quimisorción) (Torres, et al., 2017; Aguirre, et al., 2021).

4. CONCLUSIONES

La síntesis del inhibidor verde de corrosión fue realizada con éxito a partir del aceite extraído de la pulidura de arroz, obteniendo un rendimiento cuantitativo en una relación de imidazolina-amida grasa de 2 a 1 respectivamente. El análisis de Raman confirma la estructura propuesta del inhibidor. Los estudios electroquímicos muestran una eficiencia de protección contra la corrosión mayor del 92% para una concentración de 50 ppm del inhibidor. Los datos experimentales se ajustaron a la isoterma de Langmuir, indicando que el mecanismo de adsorción en la superficie es por quimisorción de los heteroatómos y cadenas insaturadas de la imidazolina grasa a los orbitales del metal.

REFERENCIAS

Aguirre, I. D. V. et al., 2021. Effect of natural inhibitors on microalloyed steel corrosion in E5 and E10 biofuels. International Journal of Electrochemical Science, XVII pp. 1-13.

Díaz, J. Z. et al. 2017. Oil Extraction from (Morelos Rice) Bran: Kinetics and Raw Oil Stability. Hindawi: Journal of Chemistry.

Dorantes, E. R. et al., 2018. Rice Bran as Source for the Synthesis of Imidazoline-type Inhibitors: Synthesis and Corrosion Performance. International Journal of Electrochemical Science, XIII, pp. 101-118.

Echeverría, R. S. et al., 2019. Spatial and temporal variation of acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. Scielo, XXXII(1), pp. 55-69.

Galvaez, A. L. et al., 2017. Use of Salvia hispanica as an eco-friendly corrosion inhibitor for bronze in acid rain. Emerald Insight, LXIV(6), pp. 654-663.

Rodriguez, J. G. G., Gutierrez Granda, D. G., Larios Galvez, A. K. & Lopez Sesenes, R., 2022. Use of Thymus vulgaris Extract as Green Corrosion Inhibitor for Bronze in Acid Rain. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion, VIII(77), pp. 1-12.

Salinas Solano, G. et al., 2018. Development and evaluation of a green corrosion inhibitor based on rice bran oil obtained from agro-industrial waste. Industrial Corps & Products, Issue 119, pp. 111-124.

Sotelo, O. et al., 2023. Corrosion Inhibition Studies of Synthesized Oleic Sources-Based Green Inhibitors From Agro-Industrial Waste. En: Handbook of Research on Corrosion Science and Engineering. s.l.:IGI Global , pp. 362-382.

Tejeda, L. P., Meza, P., Berrocal, M. & Altamiranda, E., 2014. Uso de extrctos de plantas como inhibidores de corrosión. Informador Técnico, II(78), pp. 155-165.

Torres, N. V. et al., 2017. Use of an amide-type corrosion inhibitor synthesized from the coffee bagasse oil on the corrosion of Cu in NaCl. Green Chemistry Letters and Reviews, XI(1), pp. 1-11.

ISSN: 2992-8338

Numerical study of the air capture effectiveness of a wind tower without/with inlet extensions

P. Sotelo Rodríguez *, L.G. Carreto Hernandez *, E. G. Ortiz Salvador *, R. Campos Amezcua*, S.L. Moya Acosta*

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP 62490, México

(e-mail: m22ce035@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: the modern world, there have been different problems related to the increase in electricity consumption, mainly due to global warming and population growth. Wind towers are a technology of great interest due to their ability to generate thermal comfort in buildings without the need to use electromechanical air conditioning equipment. In this work, a dynamic study of the air capture efficiency of 3 designs of entrance extensions in the windward window of a wind tower coupled to an experimental booth is presented. The extensions align the wind before entering the tower's catchment duct, increasing the induction of air inside the buildings, in this way greater natural ventilation is generated in relation to wind towers without entrance extensions. The wind conditions of Cuernavaca Mor., Mexico are considered. Border conditions were established by measuring wind speed by means of a weather station placed in the study area. It is concluded that the three entrance extensions increase the catchment efficiency of the wind tower by 11% on average, with a maximum of 18%.

Keywords: CAGETEV; CFD; Inlet extension.

1. INTRODUCIÓN

Las torres de viento han sido objeto de investigación en términos de comprender mejor las tasas de ventilación de estos sistemas. Constituyen un sistema pasivo de ventilación natural de edificaciones. Se pueden describir como estructuras verticales con canales de captación y de salida de aire, generalmente de geometría rectangular, integradas de forma lateral o en el techo de una edificación. Las torres de viento generalmente se clasifican en cinco grupos, de un solo lado, de dos, de cuatro, de seis y de ocho lados; por cada ventana orientada a barlovento existe otra a sotavento, a excepción de la de un solo lado. Las torres de viento han mostrado ser efectivas en la generación de ventilación natural y confort térmico de los espacios interiores. En los últimos años se han buscado distintas formas de mejorar el funcionamiento de las torres de viento, una de ellas es la incorporación de extensiones de entrada en las ventanas de captación, como proponen Varela-Boydo & Moya (2020) , para incrementar la captación de aire en una torre de dos lados. Otra función de las extensiones es alinear el flujo, evitando así la generación de remolinos que propicien la salida del aire captado sin que este entre al edificio. Además, tienen la función de aislar la zona de alta presión de la de baja presión que se encuentra arriba de la torre. Zaki et al. (2019) tuvieron como objetivo analizar el comportamiento del flujo en el interior de un edificio con una torre de viento de dos lados para una mejor comprensión de la influencia del flujo de aire externo en el comportamiento de la ventilación interna. Para su estudio experimental usaron un túnel de viento de circuito cerrado de la Universidad de Auckland adecuándolo para un modelo a escala 1:25 de un edificio con una torre de viento de dos lados. El modelado de dinámica de fluidos computacional (CFD) se realizó con el software Ansys-Fluent aplicando el modelo de turbulencia k-ε estándar. Los resultados numéricos obtenidos permitieron comprender a mayor profundidad los resultados experimentales a través de la visualización de los flujos. Nejat (2021) evaluó una torre de viento de dos lados incorporando una extensión de entrada de ala superior en la ventana de captación de la torre. Consideró la calidad del aire interior (IAQ) y el confort térmico adaptativo. Aplicó dos métodos de investigación, incluidas las pruebas en túnel de viento y (CFD), ampliamente empleados en investigaciones similares para evaluar la eficiencia de las torres de viento. Carreto-Hernández et al. (2023) estudiaron el comportamiento de la convección mixta en un sistema habitación-torre de viento, considerando la convección natural por calentamiento diferencial en la habitación y la convección forzada por el viento que ingresa a la torre. Realizaron análisis paramétrico considerando diferentes valores de velocidad, temperatura y humedad relativa del aire. Los resultados mostraron que la torre de viento logra un confort de sensación neutral dentro de la habitación cuando las temperaturas exteriores se encuentran entre 25 y 30 °C. El presente trabajo busca evaluar mediante CFD el desempeño de 3 diseños de extensiones de entrada en el prototipo caseta-torre de viento considerado en el estudio de Carreto-Hernández et al. (2023).

Fig.1.1. Prototipo caseta-torre de viento ubicado en Cenidet

ISSN: 2992-8338

1.1 Establecimiento de las condiciones de frontera

Para establecer las condiciones meteorológicas, condiciones de frontera y volumen de control, se instaló una estación meteorológica modelo WS-5000, Fig. 1.2, en la caseta giratoria para estudios térmicos de viviendas (CAGETEV; prototipo con registro CEN-MCIM-2O13-6 57), a la altura de la posición central de la ventana de captación de la torre de viento, la cual se encuentra a 3.425 m con respecto al nivel de piso. Esto con la finalidad de medir la velocidad de viento en esa altitud. Algunas características de la estación meteorológica son las siguientes:

Tabla 1. Variables de la estación meteorológica.

Variables de interés	Variables generales	Incertidumbre
Dirección del viento	-	± 5°
Velocidad del viento	-	± 5%
	Temperatura interior	± 1 °C
	Temperatura exterior	± 1 °C
	Humedad interior	± 5%
	Humedad exterior	± 5%
	Presión barométrica	
	Luminosidad/radiación solar	± 1
	Índice UV	± 1
	Lluvia	
	Especificaciones de la red Wifi	
	Consola de visualización	

Fig. 1.2. Estación meteorológica

La estación meteorológica toma una captura de datos por lapsos de tiempo de un minuto para obtener mejores resultados en las mediciones de las variables de interés como son velocidad y dirección de viento. Se realizó un promedio horario de las velocidades considerando 10 días de medición para delinear un día típico del mes de septiembre del 2022. Podemos observar en la Fig.1.3 las velocidades en el transcurso del día 10 de septiembre del 2022.

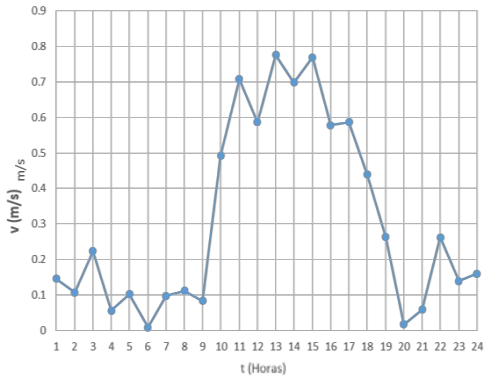


Fig.1.3. Velocidad de viento del 10 de septiembre de 2022

De acuerdo con los datos horarios obtenidos con la estación meteorológica se consideraron para el estudio las velocidades de viento que se registraron en el intervalo de las 12 a las 17 horas. En este intervalo existe un mayor disconfort térmico y las velocidades del viento son más elevadas, encontrando velocidades máximas de 0.84 m/s y una velocidad promedio de 0.65 m/s. Se realizó también un promedio en el intervalo establecido, comprendiendo los 10 días de medición, Fig. 1.4.

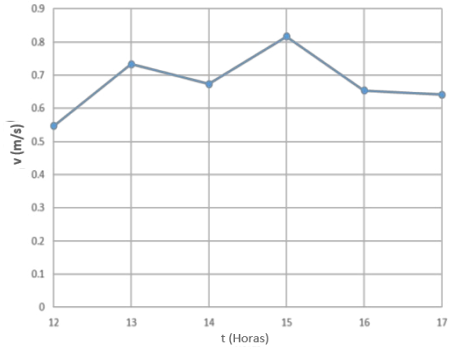


Fig. 1.4. Velocidad de viento promedio horaria considerando 10 días de septiembre de 2022

2. DESAROLLO NUMÉRICO

2.1 *Modelo físico*

Se construyó el modelo virtual del prototipo caseta-torre con dimensiones de la habitación de 2.2 m de altura por 2.7 m de largo y 2.7 m de ancho, y la torre de 3.85 m de altura, utilizando la herramienta de Spaceclaim como se muestra en la Fig. 2.1. Las medidas de las longitudes de las extensiones se toman respecto a la medida de la ventana de captación. Es importante destacar que ninguna de las extensiones aumenta el área transversal al flujo de la ventana de

ISSN: 2992-8338

entrada. En todos los casos, las ventanas tienen las mismas dimensiones proyectadas desde el frente de la torre original, de 0.62 m de ancho y 0.85 m de alto. Los modelos virtuales con extensiones de entrada se presentan en las Figs. 2.2, 2.3 y 2.4. Estos fueron seleccionados del trabajo de Varela-Boydo & Moya (2020), entre 28 diseños propuestos por estos autores. Los tres seleccionados son los que tuvieron mayor eficiencia de captación en el sistema habitación-torre que ellos consideraron.

El domino computacional consta de las siguientes dimensiones (Fig. 2.5): 5h hacia el barlovento, 15h hacia el sotavento, 5h de altura y 5h a los costados; siendo h la altura de la torre de viento tal y como lo recomiendan Nejat (2021); Zaki et al. (2019) y Montazeri et al. (2010). Posteriormente se realizó una discretización estructurada del dominio en la herramienta Mesh (Fig. 2.6).

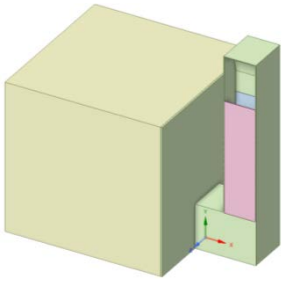


Fig.2.1. Modelo CAD del prototipo caseta-torre

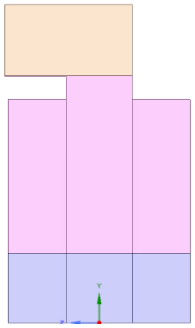


Fig.2.2. Extensión IE-100

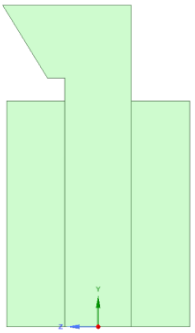


Fig.2.3. Extensión IE-100-1/3

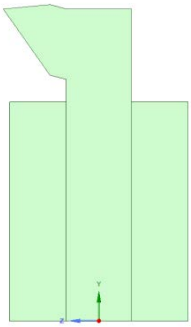


Fig.2.4. Extensión AIE 2-100

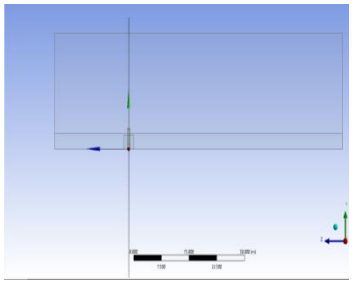


Fig.2.5. Dominio computacional

2.2 Discretización del dominio computacional

Este proceso consiste en seccionar el dominio computacional en partes más pequeñas para aplicar posteriormente un proceso de solución CFD de las ecuaciones gobernantes y del modelo de turbulencia pertinente.

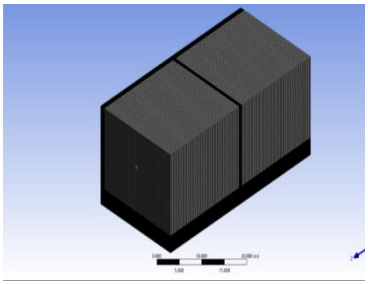


Fig.2.6. Discretización estructurada

2.3. Modelo matemático

Las ecuaciones gobernantes se establecen considerando flujo turbulento tridimensional y fluido incompresible, es estado transitorio. El modelo de turbulencia seleccionado es el $k - \varepsilon$ estándar aplicado por Zaki et al. (2019) y otros autores de trabajos relacionados a torres de viento. Las condiciones de frontera son las establecidas en la sección 1.1, considerando además la de no deslizamiento en las paredes.

Ecuación de conservación de masa.

En el caso particular de fluido incompresible la densidad del fluido no cambia, por lo que la ecuación se reduce a que la divergencia de la velocidad debe de ser nula como se expresa en la Ec. (1):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{1}$$

Ecuación de conservación de momentum.

La ecuación de momentum es la representación matemática de la segunda ley de Newton aplicada al flujo de fluidos, la cual establece que una porción infinitesimal de fluido es acelerada por las fuerzas que actúan sobre ella, es decir, la masa por la aceleración es igual a la suma de fuerzas superficiales y de cuerpo. Si el fluido presenta una relación lineal entre los esfuerzos cortantes y las deformaciones (fluido newtoniano), la ecuación de conservación de momentum (Ec. (2)) es la siguiente:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{v}\vec{v}) = \nabla(\mu\nabla\vec{v}) - \nabla p + \rho\vec{g} \tag{2}$$

Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar

El modelo $k - \varepsilon$ estándar es un modelo semi empírico propuesto por Launder y Spalding (1972) el cual se basa en la modelización de dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta k y

ISSN: 2992-8338

otra para su tasa de disipación ε. La ecuación de transporte para k se obtiene de su ecuación exacta, mientras que la de ε se deduce a partir de razonamientos físicos y analogías diversas con la de k. De esta forma, la tasa de disipación turbulenta es la variable que determina la escala de la turbulencia, siendo k la variable que fija la energía de la turbulencia; Xamán y Gijón-Rivera (2015). Los modelos $k-\varepsilon$ han demostrado su gran utilidad en casos de gradientes de presión relativamente pequeños. Del mismo modo, para flujos confinados e internos, el modelo proporciona buenos resultados cuando los gradientes de presión medios son moderados. En la obtención de este modelo se supone que el flujo turbulento está completamente desarrollado y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. La ecuación de transporte para k se obtiene al multiplicar la Ec. (2) por la componente turbulenta correspondiente de velocidad y posteriormente sumando las tres ecuaciones correspondientes (x, y, z). Después se aplica la misma secuencia y estas expresiones se restan de las anteriores, obteniendo la Ec. (3):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k\bar{v}_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu+\frac{\mu t}{\sigma k})\,\partial k\,\partial xi]+G_k+G_b-\rho_\varepsilon-Y_M+S_k \quad (3)$$

2.4 Análisis de independencia de malla.

El análisis de independencia de malla nos permite reducir el tiempo computacional sin sacrificar aproximación numérica. En este estudio se evaluaron 3 mallas con diferentes tamaños de elemento (malla fina, malla media y malla burda). Para cada malla se realizaron simulaciones con las condiciones de frontera descritas en la sección anterior. Se puede calcular una estimación del error de los perfiles de velocidad adimensionales en la cuadrícula básica, utilizando el índice de convergencia de cuadrícula (GCI), Celik et al. (2008), ver Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de Independencia de Malla (método GCI)

N_1, N_2, N_3	Malla fina, Malla media, Malla burda			
r_{21}	1.1624			
r_{32}	1.3500			
	En el volumen de entrada de la torre	En el volumen de la entrada del canal de captación	En el volumen de salida del canal de captación	Habitación
	Vel. Max (m/s)	Vel. Max (m/s)	Vel. Max (m/s)	Vel. Max (m/s)
$Ø_1$	0.96	1.09	1.08	1.08
$Ø_2$	0.97	1.08	0.92	0.97
$Ø_3$	0.93	1.10	0.78	0.82
P	5.28	3.71	207.58	8.82
$Ø_{ext}^{21}$	0.95	1.10	1.08	1.12
e_a^{21}	0.85%	1.00%	14.94%	10.55%
e_{ext}^{21}	0.71%	1.32%	0.0001%	3.66%
GCI_{fine}^{21}	0.88%	1.67%	0.0001%	4.75%

N: Número de elementos
r: Diferencia porcentual entre número de elementos
Ø: Variable de velocidad m/s
PM: Error relativo aproximado
e_a: Error relativo extrapolado
GCI: Índice de convergencia de malla fina

3. ESTUDIO NUMÉRICO DEL PROTOTIPO CASETA-TORRE SIN/CON EXTENSIONES DE ENTRADA.

Se simuló el prototipo virtual de referencia (sin extensión de entrada), mostrado en la Fig. 2.1. Asimismo se simularon los otros 3 modelos virtuales de la caseta-torre con los tres diseños de extensiones de entrada seleccionados del trabajo de Varela-Boydo & Moya (2020), Figs. 2.2, 2.3 y 2.4. La condición de frontera de velocidad en todos los casos es la velocidad máxima promedio obtenida de la estación meteorológica WS-5000, que fue de 0.84 m/s a 5H antes de la ventana de captación.

En la Fig. 3.1 se presentan los patrones de flujo en la ventana de captación de la torre y al inicio del canal de captación, para el caso de referencia (sin extensión de entrada) y para la extensión de entrada con mayor captación de aire (diseño IE-100-1/3, ver también la Tabla 3). Se puede observar que con la extensión de entrada los vectores de velocidad se alinean de una mejor manera y entran con mayor velocidad al canal de captación, generando de esta manera una mayor inducción de aire hacia la habitación. Los resultados de flujo másico captado y de velocidad máxima para todos los casos se presentan en la Tabla 3. Se obtuvieron en los dos planos indicados en la Fig. 3.2, uno en la ventana de captación de la torre de viento y otro en la salida del canal de captación. Se compararon en todos los casos la velocidad de viento y flujo másico de la torre sin extensión en la ventana de captación (caso de referencia), con las velocidades y flujos másicos en la salida del canal de captación de los tres casos de torre con extensión. Estos resultados se presentan en la Tabla 3, denotando una mayor captación de flujo másico y un aumento de la velocidad del viento en todos los diseños de extensiones de entrada. El diseño IE-100-1/3 presentó una mayor eficiencia, con un aumento del flujo másico del 18%, y un incremento de velocidad de viento del 130%.

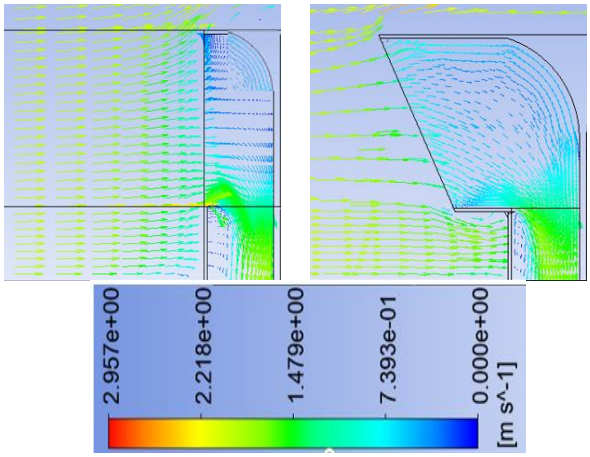


Fig. 3.1. Vectores de velocidad en la ventana de la torre sin/con extensión de entrada

ISSN: 2992-8338

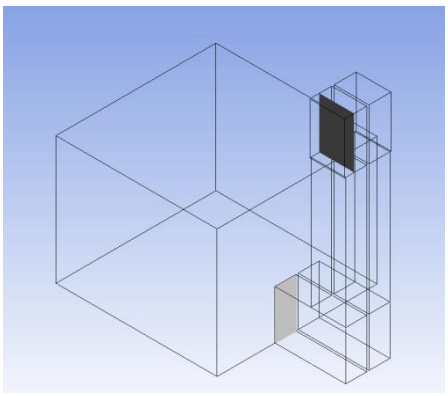


Fig. 3.2. Planos de obtención de datos para la Tabla 3

Tabla 3. Flujo másico captado y velocidades máximas en la torre sin/con extensiones de entrada

Casos estudiados	Flujo másico (kg/s)		Velocidad máxima (m/s)		Incremento de flujo másico %	Incremento de velocidad %
	Ventana de captación	Salida del canal de captación	Ventana de captación	Salida del canal de captación		
Sin extensiones	0.526	0.526	0.74	1.57	Referencia	113
Extensión IE-100	0.531	0.531	0.79	1.59	1	115
Extensión IE-100-1/3	0.616	0.616	0.88	1.70	18	130
Extensión AIE-2-100	0.599	0.599	0.91	1.72	14	133

4. CONCLUSIONES

Se realizaron mediciones de velocidad de viento para determinar las condiciones de frontera en la ventana de captación de la torre de viento, mediante una estación meteorológica. Esto permitió obtener resultados numéricos del comportamiento del flujo de aire en el sistema habitación-torre de viento con una aproximación adecuada. Se encontró que los tres diseños de extensiones de entrada estudiados propician una mayor captación de aire en la ventana de la torre, en relación a la torre sin extensión de entrada; además de incrementar aún más la velocidad del aire en la entrada del canal de captación. La extensión de entrada IE-100-1/3 es la que presentó una mayor eficiencia con un 18% de incremento en el flujo másico y un 130% de incremento en la velocidad del aire en la torre de viento.

REFERENCIAS

Carreto-Hernández L.G, Moya S. L, Varela Boydo C.A, Francisco-Hernandez A, (2023). Numerical-experimental study of mixed convection in a wind tower-room system, *Building and Environment*, 2023, 237, 110294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110294

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., & Raad, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 130(7), 0780011–0780014. https://doi.org/10.1115/1.2960953

Launder. B. E. y Spalding. D. B., "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, London, England, 1972.

Montazeri, H., Montazeri, F., Azizian, R., & Mostafavi, S. (2010). Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling Renewable Energy, 35(7), 1424–1435. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.12.003

Nejat P, M Salim Ferwati, John Calautit, Ali Ghahramani, Mohammadamin Sheikhshahrokhdehkordi, (2021). Passive cooling and natural ventilation by the windcatcher (Badgir): An experimental and simulation study of indoor air quality, thermal comfort and passive cooling power, Journal of Building Engineering, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102436,

Varela-Boydo, C. A., & Moya, S. L. (2020). Inlet extensions for wind towers to improve natural ventilation, Buildings Sustainable Cities and Society, 53. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101933

Xamán J. y Gijón-Rivera M., "Dinámica de fluidos computacional para ingenieros", Bloomington, Indiana: Palibrio, 2015.

Zaki, A., Richards, P., & Sharma, R. (2019a). Analysis of airflow inside a two-sided wind catcher building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 190(August 2018), 71–82. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.04.007

ISSN: 2992-8338

Environmental monitoring system between two sensor nodes with 9km link

E. Salgado-Lampart*, C. Morales-Morales*, A. Gonzalez-Lorence, M. Castro-Bello***

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruíz Massieu, No. 5, Fracc. Villa Moderna, C.P. 39090, Chilpancingo, Guerrero*
(e-mail: eumir.lampart@gmail.com, comorales82@gmail.com, mirna.cb@chilpancingo.tecnm.mx)

***Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro*

(e-mail: armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx)

Abstract: This article presents the connectivity capacity between two IoT devices with a link of 9 kilometers away, configured in two sensor node, powered with temperature, humidity and water level sensors. The development of a communication mechanism using data encryption between devices, and a standard Java Script Object Notation (JSON) communication format, sending it to a service API to store the data received in the coordinator, towards the database data in the cloud. The objectives of this article are: 1) Assembly of two types of device using two specific models of Arduino and LoRa antenna, which allows bidirectional communication; 2) Sending data between devices using standard data encryption and data packet in JSON format; 3) Consumption of APIs in the cloud for storage and consultation of information from the sensors collected by the devices.

Keywords: Sensor, LoRa, IoT, Web Services, WSN.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de las tecnologías de desarrollo de proyectos electrónicos ha logrado disponer de equipos miniaturizados para la implementación de proyectos que atiendan soluciones específicas, sean de bajo consumo de energía para su funcionamiento y la distribución del procesamiento ubicuo en la red. En este trabajo se exploró la posibilidad de utilizar estándares de comunicación tanto en el cifrado de datos del canal de transmisión; el estandarizado de intercambio de datos mediante la notación JSON. Esta propuesta se hace usando dos modelos de antena, que prueba la viabilidad de integrar redes inalámbricas de sensores con la capacidad de comunicación bidireccional en una red extendida.

La miniaturización y especialización de los circuitos electrónicos, el incremento de su disponibilidad y socialización del conocimiento para su uso como del nivel de programación; ha devenido en grandes avances en el diseño de soluciones electrónicas adecuadas a cada tipo de problemática identificada.

Así mismo, algunos fabricantes de sensores y placas de desarrollo, realizan avances para ofertar al mercado de dispositivos de montaje superficial que realicen actividades de monitoreo, control y automatización, otorgándoles funcionalidades de soporte y compatibilidad de interconexión de la plataforma de desarrollo Arduino y su gama de sensores disponibles.

La tecnología de transmisión y recepción de información LoRa permite el envío de pequeños paquetes de datos entre dispositivos a distancias considerables, que van desde unos pocos centímetros hasta varios kilómetros, permitiendo la ubicuidad de la red de sensores distribuidos en espacios abiertos sin la necesidad de conexión a internet.

Un sistema de Internet de las Cosas IoT, incluye en sus componentes de hardware como de software, trabajando de manera conjunta para lograr un objetivo común, que van desde captar parámetros del ambiente, datos de industrias o incluso monitorización de estado de la salud de personas (Landaluce et al., 2020).

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La literatura referente al campo de las Redes Inalámbricas de Sensores WSN se enfocan en aspectos de la fabricación de sensores, las tecnologías disponibles de los canales de comunicación de los Nodos IoT, las topologías de las WSN, los protocolos de comunicación y los campos de aplicación.

2.1 RFID, Sensores y las WSN

Parte fundamental de las redes WSN es el uso de los RFID, que son capaces de identificar y rastrear dispositivos, mientras que las WSN cooperan para recopilar y proporcionar información a partir de sensores interconectados (Landaluce et al., 2020). En los sistemas de transporte inteligentes toman la identificación proporcionada por los RFID para el control y seguimiento interno (Kavitha et al., 2022). Y la interrelación entre las redes 3G, las WSN y los RFID son determinantes para el control de acceso y gobernabilidad de las redes inalámbricas (Heydari et al., 2020), para el aseguramiento de la identificación de los nodos IoT que son generadores de la

ISSN: 2992-8338

información recabada se asocia la información obtenida con el identificador del RFID tal como es requerido para el uso en aplicaciones de seguimiento y monitores de datos médicos, obtenida por bioparches y trasmitidos en tiempo real mediante redes 3G hacia los médicos, para el análisis de datos y elaboración de los planes de tratamiento para su posterior ejecución en los pacientes (Afef Mdhaffar, 2017). El desarrollo de metamateriales que incluyen la integración de los sensores en la ropa, mediante superficies conductoras estructuradas en láminas de metal incorporadas en la ropa, cableado y placa de circuitos flexibles (Tian et al., 2019) permiten disponer de un adecuado seguimiento de los signos. La miniaturización de los sensores fabricados en materiales piezoeléctricos con cableados de óxido de zinc para convertir la energía vibratoria del cuerpo en electricidad, almacenarla en una nano batería y utilizada en el dispositivo (Queiroz et al., 2020) han permitido tener integrados en la ropa los medios necesarios para una adecuada monitorización.

2.2 Tecnologías de comunicación y protocolos

La disponibilidad de los canales de comunicación, para las WSN, han evolucionado adaptando las necesidades de conectividad, en base a las nueva necesidades del mercado, dado que existen disponibles actualmente tecnologías de conectividad de dispositivos que van desde unos pocos centímetros hasta llegar a varios kilómetros de distancia entre ellos.

La tecnología Bluetooth Low Energy BLE, reduce el consumo de energía para realizar las conexiones entre teléfonos inteligentes, ofreciendo conectividad de fácil manejo, pero reduciendo la distancia de conexión, lo que hace que éste protocolo de comunicación sea poco eficiente para las WSN (Abella et al., 2019).

Los protocolos más extendidos para comunicación entre dispositivos inalámbricos, es la tecnología WiFi que opera en las bandas de 2.4 y 5.0 Ghz (Abella et al., 2019) su capacidad de escalabilidad es elevada al poder integrar más nodos en la red (Begum & Nandury, 2023) sin mucho esfuerzo.

Al ser masivamente utilizado los usuarios de dicha tecnología poseen mayores destrezas para lanzar un ciberataque como la denegación de servicio a la red (Halder & Newe, 2023) pero la potencia de conectividad a internet en combinación con tecnologías como ZigBee o Lora dan buenos resultados en espacios abiertos como granjas (Routis & Roussaki, 2023) y actualmente existen en el mercado, ensambles de módulos de energía inspirados en el WiFi con parámetros de energía y modelos de potencia específicos para las transmisiones Lora (Dawaliby et al., 2019), y en aplicaciones de uso doméstico donde están integradas estas dos tecnologías (Pueyo Centelles et al., 2021).

El aumento del tráfico en las redes WSN exigen un mayor consumo de energía (Heydari et al., 2020), la tecnología LoRa identifica dispositivos finales que tienen energía restringida y transmiten pocos datos por el canal de comunicación y estableciendo la comunicación como una entidad externa a las redes tradicionales, lo que la vuelve una excelente opción de interconectividad para aplicaciones de ciudades inteligentes, cuidado de la salud, monitoreo ambiental e industrias (De J, Silva et al., 2017). Dicha tecnología se ha propuesto para la optimización de las redes de área amplia, pero de bajo consumo energético LPWAN, mejorando su vida útil, el costo y la eficiencia de las baterías utilizadas en los dispositivos (Naoui et al., 2016).

La realización de redes sobre el protocolo IPV6 de redes de área personal inalámbricas de bajo consumo (6LowPAN) en la cuales cada nodo dispone de su propia dirección IPV6, lo que permite una conexión directa a internet mediante el uso de estándares abiertos. (Abella et al., 2019), en la red IPV6 que consta de 10,128 direcciones, en dicho concepto de protocolos, se almacena la dirección del emisor y receptor integrados en la red, y no se requiere de ningún servidor centralizado (Shafique et al., 2020), el enrutador conectado a nodos 6LowPAN realiza la conversión a la red IPV6 (Afef Mdhaffar et al., 2017), para la salida de datos entre la red WSN hacia la red conectada a internet.

En la arquitectura TCP/IP, cada capa tiene sus aplicaciones ligeras y específicas, pero en la Capa 7 (Aplicación), los protocolos alternativos al estándar HTTP son: protocolos de cola de transferencia de mensajes (MQTT), de aplicación restringida (CoAP), de Servicio de Distribución de Datos (DDS), protocolo extensible de mensajería y presencia (XMPP) y web sockets (Cruz et al., 2019). Por lo tanto, para la capa 7 se pueden fabricar aplicaciones específicas y diseñar un protocolo para cada solución buscada en el traslado de información entre nodos de la red WSN.

2.3 Topologías de red

Las topologías de red utilizadas en las WSN, varían según la aplicación de la red, pueden ser: estrella, malla e hipercubo, dicha configuración modifica el desempeño de la red en diversos aspectos como la precisión, eficiencia y resiliencia; mostrando mayor desempeño las redes que proporcionan menor tiempo de demora y mejor consumo energético (Almajed et al., 2019).

La topología de estrella se utilizó siguiendo el protocolo ALOHA. Realizando mediciones de la calidad del servicio del tráfico de los nodos y las estaciones base (Khutsoane et al., 2017). En genera,l LoRa considera una capa física mientras que LoRaWAN es la capa de control de acceso al medio (MAC) de la pila LoRa, esta topología en red permite la comunicación entre múltiples dispositivos finales y la puerta de enlace (Jouhari et al., 2022).

Las redes locales de baja potencia con alcance inferior a los 1,000 metros, son aplicables a redes que tiene poca cobertura espacial, sin embargo, en una topología de malla, se puede aplicar a redes de cobertura más grandes (De J. Silva et al., 2017). La solución propuesta para una red LoRaWAN se basa en una topología de estrella a estrella, compuesta por tres elementos básicos, dispositivos finales, una puerta de enlace y un servidor central de la red (Evizal Abdul Kadir et al., 2018) y en comparación con la topología de malla de ZigBee, la cual no necesita nodos adicionales que funcionen como enrutadores, reduce el costo y la complejidad de la red (Danco Davcev et al., 2018).

ISSN: 2992-8338

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Propuesta del experimento de comunicación

Se realizó un experimento de comunicación bidireccional entre dos dispositivos desarrollados utilizando dos modelos diferentes de antenas LoRa. Las ubicaciones variaron a medida que se lograron mayores distancias de conectividad, como se muestra en la Fig. 1

Fig. 1.- Vista 3D Chilpancingo, Gro.

3.2 Diseño del dispositivo IoT

Para el envío de datos se basó el dispositivo en la configuración de sensores comúnmente encontrados en estaciones climatológicas. Los sensores considerados fueron: nivel de agua, temperatura ambiental, humedad y panel solar.

Los dispositivos tipo SensorNode disponen de un sensor de temperatura de la tarjeta de comunicación Lora y un GPS incorporado. El dispositivo GatewayNode dispone adicionalmente la conectividad WiFi para el traslado de información de la red WSN hacia los WebServices. El diagrama del componentes se muestra en la Fig. 2.

Fig 2. Componentes del dispositivo del SensorNode.

El ciclo de operación del dispositivo IoT incluye las fases de: Arranque, Detección, Lectura, Paquete, Comunicación, Hibernación. Cada una de las fases contiene su propio flujo interno de actividades, ver Fig. 3.

Fig. 3. Fases de operación del SensorNode.

La topología de red propuesta para el experimento es en conectividad de estrella, sin embargo, el experimento se realizará solo con dos dispositivos uno de tipo SensorNode y otro de tipo GatewayNode, ver Fig. 4.

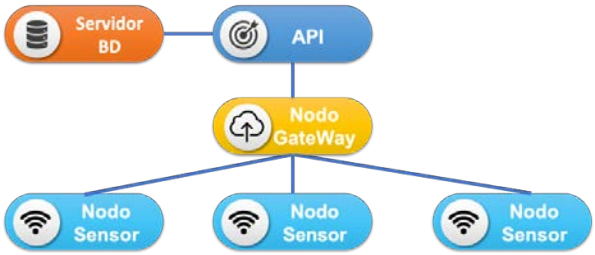


Fig. 4. Topología de red.

3.3 Componentes del nodo sensor

Los componentes funcionales de los nodos son:

- Unidad central basada en Arduino.
- Antena LoRa con sensor de temperatura.
- Sensor nivel de agua.
- Sensor de temperatura ambiental y humedad.
- Panel solar.
- GPS.

4. HARDWARE

Una parte fundamental del desarrollo del prototipo de dispositivo SensorNode es el hardware, el cual en sí mismo proporciona energía, conectividad física a los sensores conectados, obtiene las lecturas de los sensores, procesa los datos, forma el paquete de información y realiza el envío de información hacia el dispositivo GatewayNode.

En la revisión bibliográfica se ha comprobado la eficiencia de la combinación de tecnologías WiFi-Lora utilizado como puente de información inicialmente transmitida mediante LoRa y enviándola posteriormente hacia internet vía WiFi.

ISSN: 2992-8338

4.1 Placa de desarrollo Arduino

La placa de desarrollo de Arduino ESP32-WROOM- 32 es un módulo aplicable para diversas aplicaciones, como sensores IoT, redes de bajo consumo energético y alta demanda de procesamiento. El chip posee dos núcleos que pueden ajustar la velocidad de frecuencia de reloj, desde los 80 MHz hasta los 240 MHz.

El usuario final puede decidir el modo de trabajo encendiendo o apagando el procesador para minimizar el consumo energético. La integración con WiFi lo hace ideal como puerta de enlace entre las dos tecnologías de comunicación de datos.

El canal WiFi soporta los protocolos 802.11 b/g/n con velocidades de transmisión de datos hasta 150 Mbps. Soporta el rango de frecuencia de los 2.4 Ghz. Y rangos de temperatura operacional de – 40 °C hasta los +85 °C.

La placa de desarrollo Arduino UNO es una placa de desarrollo que permite la conexión de diversos tipos de periféricos. Su rango de operacional de temperatura de -40℃ a +85℃. En temperatura extrema el componente EEPROM, el regulador de voltaje y el cristal del oscilador no funcionan de manera correcta. La información de estos periféricos conectados se traslada al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos obtenidos.

4.2 Antena LoRa

Las antenas del fabricante REYAX modelo RYL998 y RYLR993, tienen una interface de comandos UART compatible con Arduino. El control de la comunicación mediante comandos AT y se pueden establecer los parámetros de operación como Baudios, cantidad de bits de datos, paridad, bit de parada, conectar a la red LoraWan, definir el ID único del dispositivo, la sesión de la red, y el identificador en la red, banda de transmisión y la clase de la tecnología Lora.

4.3 Sensor de nivel de agua

Es un dispositivo con una serie de alambres paralelos expuestos con el fin de determinar el nivel de agua en valores de salida de conversión de señales analógicas y digitales. Puede obtener nuevos datos cada 2 segundos. Se alimenta a 5V, devuelve un pin de valor analógico comprendido entre VCC y GND. El pin S se conecta al Arduino como entrada analógica, el valor de la lectura será mayor en función de la superficie del sensor esté cubierto de agua.

4.4 Sensor de temperatura ambiental y humedad

Es un sensor que mide la temperatura y la humedad con salida digital hacia el microcontrolador de 8 bits, garantizando la adquisición como señal digital confiable dado el sensor de temperatura de tipo resistivo NTC. Da respuesta rápida para mediciones frecuentes con capacidad de anti interferencias. Posee coeficientes de mediciones almacenadas y utilizadas en el proceso de detección de señal en el sensor. Bajo consumo de energía y un solo cable serial como interfaz de salida de datos. Rangos de mediciones desde 0 a 50 °C y de 20 a 90 % de humedad, consumo de energía de 3 a 5.5 VCC.

4.5 Panel solar

Es un dispositivo que aprovecha la energía solar y la transforma en electricidad. Otorga la energía necesaria para el funcionamiento del dispositivo, elaborado en silicio policristalino que otorga 5 Vcc y 160 mA en condiciones de buena luminosidad solar.

4.6 GPS

Es una antena inteligente detectora de hasta 66 satélites a la vez, otorga actualización de la navegación, actualización de lecturas desde 1 Hz hasta 10 Hz, de bajo consumo de energía y buena recepción en ciudades y caminos con follaje denso. Rango de operación desde -515 hasta 18,000 msnm. Voltajes desde 3 hasta 5.25 Vcc a 2 mA. Su rango de operacional de temperatura de -30℃ a +85℃.

5. SOFTWARE

El grupo de componentes del dispositivo es el software utilizado desde el proceso de diseño, programación, modelado de datos, programación de APIs y aplicaciones de servicio.

5.1 IDE Arduino

Es un programa integrador de las funcionalidades requeridas para el desarrollo de programas basados en Arduino integra un editor de código, con instalador de bibliotecas de forma directa y un administrador de paquetes para las placas de desarrollo, integra el compilador y el cargador de código hacia las placas de desarrollo, administrador de librerías, monitor y graficador de datos del puerto serial.

5.2 JSON formater

Es un software en línea que permite administrar nodos de datos en notación JavaScript Object Notation (JSON). Es un formato creado por Douglas Crockford dado a que el formato XML y otros formatos de datos eran demasiado detallados y no lo suficientemente legibles para los humanos. La estructura del contenido del JSON establece una colección de pares ordenados nombre/valor donde los nombres son cadenas y los valores pueden ser cadenas, números, valores booleanos, nulos o incluso otros objetos. JSON es un estándar en el consumo e las API web debido la cantidad de caracteres optimizada y no requiere ninguna declaración previa de variables. Se puede utilizar en cualquier lenguaje de programación en lugar de limitarse a un solo lenguaje, lo que lo hace más interoperable con otros lenguajes e interfaces de software.

5.3 Plataforma WEB

Es un software de consulta y visualización de datos generados desde los dispositivos SensorNode, realizado en Framework Angular v11.0.2 programado con el lenguaje de programación TypeScript.

6. WEBSERVICES

Componente intermedio entre los dispositivos GatewayNode, la base de datos y la plataforma de consulta o entre la base de datos y las aplicaciones móviles.

ISSN: 2992-8338

6.1 API de servicio

Este componente de software disponible como recurso en la nube, recibe y entrega peticiones desde los nodos hacia la base de datos y es intermediario entre la base de datos y los aplicativos de consulta de datos. Desarrollada en Framework Laravel v8.83.27 para internet con núcleo desarrollado en leguaje PHP v8.0.29. Dispone de métodos de manipulación de datos GET, POST, PUT, DELETE y se utiliza como el estándar para el consumo de servicios web. Cada entidad en la base de datos tiene signado un punto de conexión para cada tabla o entidad y ofrece un adecuado control de los datos ingresados y consultados.

7. RESULTADOS

La propuesta de diseño funcional y operacional de los dispositivos SensorNode, ver Fig. 5, y GatewayNode, ver Fig. 6, Se realizó de forma satisfactoria su integración, tanto en sus componentes de hardware como de software. Logrando que los dispositivos se energizaran con los paneles solares, que inician la lectura de los sensores conectados, la formación del JSON de datos y el envío mediante la antena LoRa.

Del lado del GatewayNode se logró energizar mediante el panel solar del dispositivo, realizando la conectividad a una red WiFi cercana, disponible y cada vez que se recibía un paquete de datos vía LoRa, se realizaba el reenvió a la API vía WiFi.

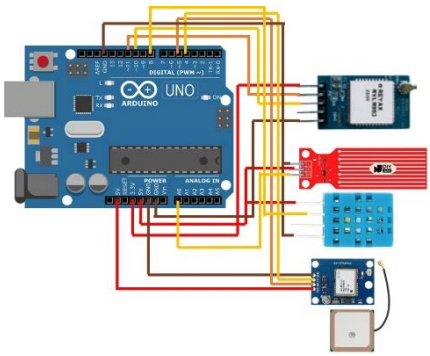


Fig. 5. SensorNode.

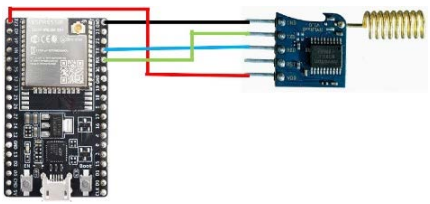


Fig. 6. GatewayNode.

Las distancias de comunicación bidireccional que se lograron inicialmente fueron de solo algunos metros de distancia, y realizando ajustes tanto de hardware como de software logrando establecer la comunicación a un poco más de 9 kilómetros de separación entre los dispositivos.

Derivado de la orografía de la ciudad las distancias disponibles para realizar las trasmisiones de lado a lado de la misma no exceden los 4 kilómetros. Y los intentos de conectividad a lo largo de la ciudad son infructuosos debido a que existen muchos obstáculos físicos y electrónicos que además de generar interferencia de radiofrecuencia, y no lograr la línea de vista entre los dispositivos, lo cual es requisito indispensable para lograr pruebas satisfactorias de comunicación.

Fig. 7. SensorNode en funcionamiento.

Fig. 8. GatewayNode en funcionamiento.

Posteriormente, al realizar pruebas de conectividad en localidades foráneas a la ciudad, se logró un enlace de los dispositivos a una distancia de 9,001 metros de separación, ver Fig. 9. Una vez establecido el enlace, se realizó la carga de lecturas a la API de servicio, la cual almacena la información en una base de datos en la nube.

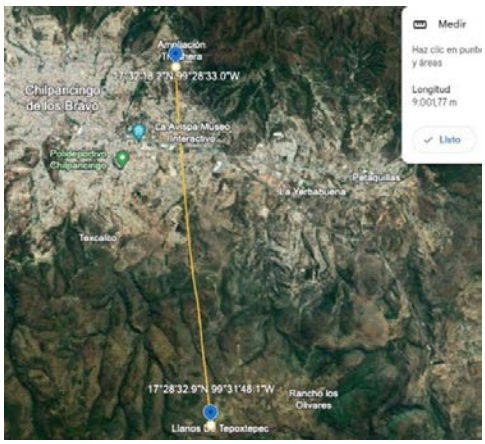


Fig. 9. Distancia de conectividad de 9,001m.

ISSN: 2992-8338

CONCLUSIONES

Este trabajo contempló el diseño de dos dispositivos IoT, uno SensorNode que integra sensores ambientales para ser adquiridos, procesados y enviados; y los dispositivos GatewayNode que son los que reciben información desde la antena LoRa y retrasmiten los datos vía WiFi a la API disponible en la nube como un Webservice.

Realizar la comunicación bidireccional entre los SensorNodes y GatewayNode utilizando un cifrado de datos AES y un estándar de intercambio de datos JSON a distancias relativamente grandes, logrando la conectividad a 9 kilómetros, permitió comprobar y validar el diseño de los dispositivos, el establecimiento de una red ad hoc entre ellos, la lectura de los sensores conectados, la transmisión y recepción de la información de manera cifrada, el consumo de la API de servicio y el almacenamiento de los datos en la base de datos en la nube, demostró que es factible realizarlo mediante el uso de tecnologías Lora-WiFi para proyectos de conectividad en grandes extensiones.

En temas de trabajos futuros se recomienda revisar aspectos del rendimiento del consumo de energía, el uso de baterías de respaldo para disponer de autonomía en horas donde el panel solar no ofrece el soporte necesario.

Respecto a la mejora de la latencia de los dispositivos SensorNode y los GatewayNode se deberá explorar técnicas de ruteo incorporadas en los dispositivos y procedimientos disparadores de esos procesos de exploración de mejores rutas invocadas desde la plataforma web e inyectada a los dispositivos SensorNode y GatewayNode.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abella, C. S., Bonina, S., Cucuccio, A., D'Angelo, S., Giustolisi, G., Grasso, A. D., Imbruglia, A., Mauro, G. S., Nastasi, G. A. M., Palumbo, G., Pennisi, S., Sorbello, G., & Scuderi, A. (2019). Autonomous Energy- Efficient Wireless Sensor Network Platform for Home/Office Automation. IEEE Sensors Journal, 19 (9), 3501–3512.

Begum, B. A., & Nandury, S. V. (2023). Data aggregation protocols for WSN and IoT applications – A comprehensive survey. En Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences (Vol. 35, Número 2, pp. 651–681). King Saud bin Abdulaziz University.

Cruz, M. A. A., Rodrigues, J. J. P. C., Lorenz, P., Solic, P., Al-Muhtadi, J., & Albuquerque, V. H. C. (2019). A proposal for bridging application layer protocols to HTTP on IoT solutions. Future Generation Computer Systems, 97, 145–152.

Dawaliby, S., Bradai, A., & Pousset, Y. (2019). Adaptive dynamic network slicing in LoRa networks. Future Generation Computer Systems, 98, 697–707.

De, J., Silva, C., Rodrigues, J., Alberti, A. M., Šolić, P., De Carvalho Silva, J., Rodrigues, J. J. P. C., Alberti, A. M., Solic, P., & Aquino, A. L. L. (2017). LoRaWAN-A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities Modeling and Simulation of ATM Networks View project NovaGenesis View project LoRaWAN-A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities.

Halder, S., & Newe, T. (2023). Radio fingerprinting for anomaly detection using federated learning in LoRa-enabled Industrial Internet of Things. Future Generation Computer Systems, 143, 322– 336.

Heydari, M., Mylonas, A., Tafreshi, V. H. F., Benkhelifa, E., & Singh, S. (2020). Known unknowns: Indeterminacy in authentication in IoT. Future Generation Computer Systems, 111, 278–287.

Kavitha, T., Pandeeswari, N., Shobana, R., Vinothini, V. R., Sakthisudhan, K., Jeyam, A., & Malar, A. J. G. (2022). Data congestion control framework in Wireless Sensor Network in IoT enabled intelligent transportation system. Measurement: Sensors, 24.

Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I., & Muralter, F. (2020). A review of iot sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks. Sensors Vol. 20, Número 9.

Naoui, S., Elhdhili, M. E., & Saidane, L. A. (s/f). Enhancing the security of the IoT LoraWAN architecture.

Pueyo Centelles, R., Meseguer, R., Freitag, F., Navarro, L., Ochoa, S. F., & Santos, R. M. (2021). LoRaMoto: A communication

Queiroz, D. V., Gomes, R. D., Fonseca, I. E., Benavente-Peces, C., & Alencar, M. S. (2020). Using nanosensors in wireless sensor networks. En Nanosensors for Smart Cities (pp. 515–526). Elsevier.

Routis, G., & Roussaki, I. (2023). Low Power IoT Electronics in Precision Irrigation. Smart Agricultural Technology, 5.

Shafique, K., Khawaja, B. A., Sabir, F., Qazi, S., & Mustaqim, M. (2020). Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios. En IEEE Access (Vol. 8, pp. 23022–23040).

Tian, X., Lee, P. M., Tan, Y. J., Wu, T. L. Y., Yao, H., Zhang, M., Li, Z., Ng, K. A., Tee, B. C. K., & Ho, J. S. (2019). Wireless body sensor networks based on metamaterial textiles. Nature Electronics, 2(6), 243–251.

ISSN: 2992-8338

Proposal of a rainwater collector in industrial warehouses

**M.A. Hernández-Romero, A. González-Lorence,
C. Morales-Morales, M. Castro-Bello**

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río.
Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe.
C.P. 76800 San Juan del Río, Querétaro.
m23590615@sjuanrio.tecnm.mx*

Abstract: A rainwater harvesting system is a solution that allows collect and use rainwater efficiently for a variety of uses. This system has several components, including storage tanks, a distribution network, gutters and channeling system, waterproof roofs or surfaces for collection, and filters to remove solid contaminants. This research work proposes the development of a system with advanced technologies to collect, store and manage rainwater, to generate economic and environmental benefits from the industrial sector, applying IoT metedologies (Internet of Things), which allows companies to maximize efficiency and sustainability in water management, and in turn reduscates the cost and dependence on non-renewable water sources.

Keywords: Harvesting, Pluvial Water, Internet of Things, SCALL, Sensors.

1. INTRODUCCION

La captación de agua Pluvial es el proceso de recolectar el agua de lluvia que cae sobre los techos u otras superficies impermeables y almacenarla para su uso posterior (Wambeke, 2013). La recolección de agua de lluvia es una tecnología sustentable que brinda beneficios a nivel individual, comunitario y ecológico.

En el proceso de investigación se demuestra la antigüedad del tema, por lo que se hace un recuento histórico desde los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia más antiguos, que se remontan a 2000 años a.C. hasta los sistemas modernos, que son ampliamente utilizados en muchas regiones del mundo (Wambeke, 2013).

En el siglo III y IV a.C. la civilización Romana estaba compuesta por edificios unifamiliares llamados "Domus", diseñado por un espacio principal a cielo abierto llamado "Atrio", lugar donde se encontraba un estanque de agua principal que recolectaba el agua de lluvia, que pasaba por un orificio en el techo (llamado compluvium)".

En Centro América en el siglo X a. C., se estableció el imperio Maya, al sur de la ciudad de Oxkutzcab, ubicada en el pie de la montaña de Puuc, en el estado de Yucatán. El agua de lluvia se recolectaba en un área de 100 a 200 m2 y luego se almacenaba en cisternas llamadas "Chultuns", las cuales se encontraban enterradas en suelo impermeabilizado y tenían un diámetro de alrededor de 5m. Este sistema proporcionaba agua a la población y se utilizaba para riego de cultivos, figura 1, donde se puede ver su disposición en el suelo (Figura 1), (Suárez, - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, 2006).

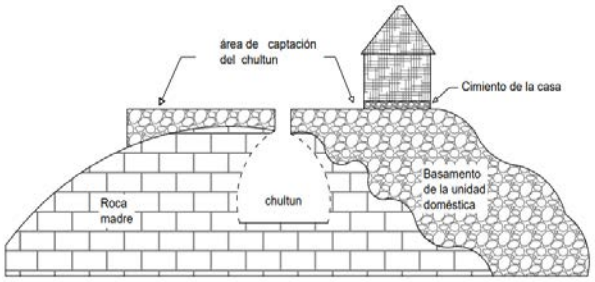


Figura 1. Chultun. (Suárez, - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, 2006).

2. PROBLEMATICA

En la actualidad el ser humano se expande y desarrolla, enfrentándose a una serie de nuevos problemas ambientales que antes no existían. Estos incluyen el calentamiento global, la contaminación, la escasez de recursos y la creciente demanda de energía, lo que lo obliga a tomar conciencia de su impacto y su responsabilidad con el planeta para proteger a todas las especies que lo habitan (Petersen, 1999).

La deforestación, la transformación de los páramos debido al cultivo agrícola, la contaminación de ríos, cuencas y lagos, el mal procesamiento de desechos industriales, el uso indebido de aguas subterráneas y la falta de conciencia de la población ponen en riesgo el futuro del agua. Por lo tanto, es necesario aumentar

ISSN: 2992-8338

la disponibilidad de agua dulce y perfeccionar los métodos actuales para satisfacer la demanda continua, mejorar la cantidad y calidad del agua. Como una gran alternativa a este problema, el proyecto actual se centrará en el análisis de los sistemas de recolección y aprovechamiento de agua de lluvia (López, 2016).

3. MOTIVACION/JUSTIFICACION

El agua, como recurso hídrico, es esencial para el desarrollo de la vida en el planeta, y se encuentra en varios estados y en diversos lugares. Aproximadamente, 97,5% de este recurso se encuentra en los océanos y mares, siendo el agua salada cuyo uso es complicado y limitado. El 2.5% restante es agua dulce disponible, del cual el 68,7% corresponde a glaciares en capas de hielo en el ártico y cumbres nevadas, el 30,1% se encuentra en acuíferos subterráneos, el 0,8 % en permafrost y el 0,4 % restante en aguas superficiales y en la atmosfera. Este último 0,4 % de agua dulce disponible, que es el de más fácil acceso, se divide en 67,4% en lagos, 12,2% en el suelo bajo forma de humedal, 9,5% en la atmosfera, 8,5% en humedales, 1,6% en ríos, 0,8% en plantas y animales (Durán, 2016).

La instalación de sistemas de captación y almacenamiento de lluvias puede ahorrar gran parte del consumo de agua potable en un hogar, porque el agua es un recurso natural esencial y cada vez es menos disponible. Estos sistemas podrían llegar a convertirse en una parte fundamental de todo tipo de construcciones sostenibles. El agua almacenada puede ser reutilizada para usos no potables como riego, jardinería, descargas de inodoro, uso industrial (BABLE, 2023.

4. OBJETIVO GENERAL

Revisar y analizar diversas propuestas de tecnologías de captadores de agua pluvial reportados en la literatura, para elaborar una propuesta de captador de agua pluvial en función de las tecnologías revisadas y sus aplicaciones.

4.1 Objetivos específicos

1.Identificar los diferentes captadores de agua pluvial reportados en la literatura.

2. Discernir los captadores de agua pluvial con mayor uso en la industria y en hogares que usen tecnologías inteligentes.

3. Elaborar una propuesta de captador de agua pluvial en función de las tecnologías revisadas y sus aplicaciones.

5. PROPUESTA DE SOLUCION

El análisis de sistemas de captación de agua permitirá proponer un sistema con tecnologías avanzadas y buenas prácticas para recolectar, almacenar y gestionar el agua de lluvia de manera eficiente, lo que generará beneficios económicos y ambientales para el sector industrial.

Los objetivos de un Sistema Inteligente de Captación de Agua varían según la industria y las necesidades de cada empresa. Sin embargo, estos son algunos objetivos comunes que se buscan lograr al instalar un sistema de captación de agua inteligente en un entorno industrial:

a. Diseñar un sistema de captación de agua pluvial que pueda recolectar y almacenar de manera eficiente el agua de lluvia en la instalación industrial.
b. Integrar sensores y tecnología IoT (Internet de las cosas) para monitorear en tiempo real los niveles de agua y llenado de los tanques.
c. Implementar un sistema de control avanzado que permita la distribución automática de agua pluvial cuando sea apropiado.
d. Diseñar una red de tuberías que transfiera el agua recolectada a las áreas de la instalación que la requieran, como sistemas de riego, sistemas de enfriamiento o procesos industriales.

El desarrollo de este Sistema de captación de agua pluvial Inteligente contempla dos fases, diseño y planificación, tal como se muestra a continuación

Fase I. Diseño

En entornos industriales, la implementación de un Sistema Inteligente de Captación de Agua Pluvial puede ofrecer una variedad de resultados y ventajas importantes. Estos incluyen la instalación de sensores de lluvia (ultrasónicos o capacitivos) en áreas estratégicas para detectar la lluvia en tiempo real, la utilización de canaletas en techos y superficies impermeables para canalizar el agua de lluvia hacia puntos de recolección y electroválvulas para facilitar la apertura o el cerrado del flujo pluvial dentro de los tanques de recolección, Figura. 2.

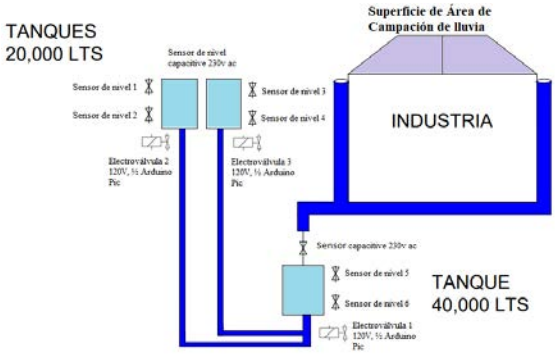


Figura 2. Sistema de Captación de Agua Pluvial.

La inversión en tecnologías y prácticas inteligentes para la captación de agua pluvial puede tener beneficios a largo plazo para la empresa y el medio ambiente, en base al diseño se propone el siguiente Sistema Inteligente de captación de agua pluvial.

ISSN: 2992-8338

1. En el tanque principal se instalará un sensor de lluvia (capacitive 230v ac), para detectar la presencia de agua al medir la capacidad eléctrica entre dos placas conductivas. Cuando las gotas de lluvia caen sobre las placas, aumenta la capacidad eléctrica, lo que se puede detectar y utilizar para activar o desactivar el dispositivo.

2. En el tanque principal T1: 4000 Lts y tanques secundarios T2:2000 Lts y T3:2000 Lts se colocarán 6 sensores de nivel en ultrasónicos (4-20 mA, 2 hilos), las ondas ultrasónicas se utilizarán para medir la distancia entre el sensor y la superficie de un líquido o sólido. Para realizar esta medición, se observará el tiempo que tarda la señal ultrasónica en viajar desde el sensor hasta la superficie y regresar al sensor. Al implementar un sensor Broker MQTT (Transporte de Telemetría de colas de mensaje), el cual es un protocolo de mensajería ligero que se utiliza comúnmente en el ámbito de IoT (Internet de las cosas), para la comunicación entre dispositivos, integrando la lógica necesaria para tomar decisiones o realizar acciones específicas.

3. Por último, se emplearán 3 electroválvulas (120V, ½ Arduino Pic), para controlar el llenado de los tanques con capacidades de T1:40000 Lts, T2:20000 Lts, T3: 20000 Lts, el microcontrolador tendrá la capacidad de monitorear los niveles de agua y activar las electroválvulas según sea necesario para mantener niveles específicos. Esto resultará en un ahorro de agua utilizada en los baños, los lavabos y el vertedero.

Fase II. Planificación

1. Evaluación del sitio: Analizaremos su instalación industrial en profundidad para determinar las áreas ideales para la captación de agua de lluvia, como techos, pavimentos y superficies de escorrentía.

2. Dimensionamiento del Sistema: Calcularemos la capacidad de almacenamiento requerida, la infraestructura necesaria (tanques, tuberías, sistemas de filtración) y la ubicación ideal de los componentes.

3. Selección de tecnología: Para la gestión inteligente del sistema, implementaremos sensores y sistemas de monitoreo para permitir un control automatizado y una toma de decisiones informada.

6. ALCANCES

Proponer un captador de agua pluvial en el sector industrial. Estos sistemas pueden utilizarse para aplicaciones no críticas, abarcando todos los aspectos necesarios para el diseño, implementación con la revisión de la literatura.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a la literatura presentada, se puede demostrar que el uso y aprovechamiento de aguas pluviales se está convirtiendo en una gran alternativa no común, permite reducir el impacto en las fuentes de abastecimiento condicionales en las zonas industriales.

A partir de esto se concluye que la propuesta del Sistema de captación de agua pluvial Inteligente, brindara una solución sostenible y un ahorro económico considerable.

El sistema de aprovechamiento pluvial propuesto es sencillo de manera intencional para que pueda instalarse con conocimientos técnicos básicos de programación. Además, es modular, lo que significa que solo puede implementar los niveles de almacenamiento necesarios. También es un sistema escalable lo que implica, una vez iniciado, puede ampliarse y adaptarse a las demandas de la industria. Como resultado, es replicable para el beneficio de los interesados.

El cambio climático y el aumento de la demanda del vital líquido han causado una crisis de escasez. Como resultado, los SCALL (Sistema de captación de agua de lluvia) se han desarrollado en varias partes del mundo como una alternativa para el uso del recurso hídrico según las necesidades de las industrias.

BIBLIOGRAFIAS

Bable, P. (2023). *Bable*. Obtenido de https://www.bable-smartcities.eu/es/explorar/soluciones/solucion/smart-rainwater-harvesting.html

CONAGUA. (2023). *Programa Nacional para captación de agua de* México.

CONAGUA, 2. (2015). *Monitor de Sequía de México*. Obtenido de https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico

Durán, J. S. (2016). *Estado del arte de los sistemas de captación y aprovechamiento de aguas lluvias como alternativa en el ahorro de agua potable en viviendas.* Bogota D.C.

Garduño, D. M. (1998). *Sistemas de captación de agua de lluvia para uso domestico en america latina y el Caribe.*

Juden, T. (2022). Smart Rainwater Harvesting for Sustainable Potable Water Supply in Arid and Semi-Arid Areas. *Sustainability*.

López, J. C. (2016). Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como medio alternativo. *Ingenieria-Revista Academica* .

Oberascher, M. (May 16,2019). Advanced Rainwater Harvesting through Smart Rain Barrels.

Ochoa, B. d.-J. (2012). *La magia del Agua en el Río Titicaca.* Lima : Banco del Crédito.

Petersen, G. y. (1999). El estudio de agua lluvias .

ISSN: 2992-8338

Pradhan, R. (26 Oct 2019). Smart Rainwater Management: New Technologies and Innovation. *Smart Urban Development*.

Siller, D. (2019). Sistema de Captación de Agua. *RUA*.

Smink, V. (2022). *Cómo Paraguay se convirtió en uno de los países que mejor distribuye el agua en el mundo.* Paraguay: BBC News Mundo, Cono Sur.

Suárez, J. A. (2006). *Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*.

Suárez, J. A. (5-7 de junio de 2006). - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. Brasil , João Pessoa. Obtenido de https://caucebajio.com/sistemas-de-captacion-de-agua-de-lluvia-una-propuesta-para-la-reutilizacion-sostenible-del-agua/

Tarazona, D. (4 de ABRIL de 2023). *MONGABAY*. Obtenido de https://es.mongabay.com/2023/04/conferencia-del-agua-de-la-onu-latinoamerica/

Velázquez, J. H. (2012). *Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un ecobarrio de la Cd. de México.* CDMX: Tesis.

WWF. (s.f.). *WWF Mesoamérica*. Obtenido de https://www.wwfca.org/nuestrotrabajo/clima_energia/impacto_cambio_climatico_latinoamerica/

Yánez-Yánez, Á. W. (2016). El agua en América Latina. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 1-2.

ISSN: 2992-8338

Experimental study of the effect of a green façade on the interior temperature of a module under Cwa climate conditions

Silvia Ríos Espinoza*, E. Sima*, M.A. Chagolla-Aranda*, M. A. Solano-Maya*, Samanta López Salazar*

**TecNM/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos.*
(m22ce034@cenidet.tecnm.mx, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx, miguel.ca@cenidet.tecnm.mx, d19ce072@cenidet.tecnm.mx, d18ce057@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: An experimental study focused on the measurement of the temperature in different sections of two test modules with and without green facade located on the roof of an educational building in Cuernavaca, Morelos is presented. The experimental analysis was carried out during 144 h, approximately 6 days, of continuous measurement where the effect of ambient temperature, solar radiation, wind speed and relative humidity on the temperature of the modules was considered. It was found that the application of a green facade on the south wall of the test module reduced the outside and inside surface temperature of the test wall by 6 °C and 3 °C, respectively. In addition, it reduced the air temperature inside the cavity by 2 °C, with respect to the wall without a green facade. The results indicate that the incorporation of the green façade shows satisfactory results as a temperature reduction method due to two main factors: (1) reduction of solar heat gain due to the shading effect and (2) moisture absorption and evaporation.

Keywords: green façade, thermal comfort, sustainability, green architecture, urban heat island (UHI)

1. Introducción

En el área rural, la vegetación y los espacios amplios y abiertos dominan el paisaje. Los árboles y las plantas no solo proporcionan sombra, también ayudan a disminuir la temperatura de la tierra y el aire. Por otro lado, en las ciudades urbanizadas, las superficies son secas e impermeables como los techos, veredas, calles y estacionamientos. A medida que el desarrollo urbano avanza, las plantas van desapareciendo y son sustituidas por edificios y pavimento, este cambio conduce a que haya menos sombra y humedad en el aire para mantener la ciudad fresca, además, esto contribuye a que las temperaturas sean más altas, lo que causa las llamadas islas de calor urbano. Este fenómeno produce un aumento considerable en la temperatura de las ciudades en comparación con la temperatura que se presenta en las zonas rurales.

Con el incremento de las temperaturas también aumenta de forma indirecta el consumo energético en el sector residencial, debido a la demanda de energía eléctrica para mantener condiciones de confort térmica, es decir, niveles de temperatura agradables para cada región climática. No obstante, el incremento en la demanda de energía eléctrica crea un ciclo inquebrantable entre demanda y producción de energía, lo que involucra la quema de combustibles fósiles, que producen gases de efecto invernadero, los cuales son causa principal del cambio climático, que se traduce en un aumento considerable de la temperatura promedio anual.

Una manera de reducir el consumo de energía eléctrica en el sector residencial está relacionada con el rediseño de la envolvente de la edificación, mediante materiales de construcción o fachadas adicionales que permiten reducir la ganancia de calor no deseada durante el verano y prevenir la pérdida de calor en invierno. En este sentido, la integración de sistemas de vegetación en construcciones en áreas urbanas tiene un gran potencial para aumentar la calidad del entorno urbano, la gestión de aguas pluviales, así como como el suministro de agua y la calidad del aire, la vegetación densa en entornos urbanos marca una disminución de la temperatura y las emisiones de carbono, así como la reducción de los efectos de las islas de calor. Además de los profundos efectos en el medio ambiente, los sistemas de vegetación proporcionan beneficios adicionales al público, como los aspectos sociales y económicos (Perini et al., 2013), además de que preservan la naturaleza y ofrecen un entorno visual amigable con el entorno sustentable. Además, la presencia de vegetación tiene un gran impacto psicológico en los habitantes urbanos, además de mejorar la estética visual de las ciudades y elevar los precios de los bienes raíces.

Por lo tanto, se enfatiza que las condiciones micro climáticas de los edificios existentes pueden ajustarse de manera rentable y ecológica utilizando diferentes tipos de sistemas de vegetación. Los desarrollos más recientes en muros verdes se centran en el diseño de sistemas para lograr soluciones técnicas más eficientes y un mejor rendimiento en todas las fases de construcción. Con la implementación de paredes verdes, adoptada a gran escala, es posible atenuar el efecto de isla de calor urbano y las temperaturas internas en las viviendas y edificios. Los edificios altos se están convirtiendo en un tipo de hogar común en muchas ciudades, y considerando el papel de las paredes externas en la ganancia de calor, se espera que las paredes verdes tengan un gran potencial para mejorar el rendimiento térmico (Salazar, 2017).

(Sánchez et al., 2018) mostró el potencial de mitigación de ganancia de calor solar y la efectividad de las fachadas verdes para mantener la temperatura al interior de un recinto constante durante un mayor número de horas. Posteriormente, (Tudiwer

ISSN: 2992-8338

et al., 2019) analizaron la resistencia térmica de paredes con y sin fachada verde y mostraron que añadir plantas redujo el coeficiente global de transferencia de calor, U, entre 80 – 90 %. Por otro lado, (Koch et al., 2020) demostraron que las fachadas verdes reducen la temperatura superficial de la pared hasta 5 °C en condiciones de verano e invierno, mientras (Daemei et al., 2021) mostraron que la fachada verde reduce la temperatura de un recinto hasta en 9 % y el nivel de humedad relativa en 32 %. En cuanto al impacto ambiental, (Blanco et al., 2021) mostraron que la fachada verde presenta un mejor desempeño ambiental en comparación con sistemas de protección solar de aluminio o PVC. Además, (Susca et al., 2021) señalaron que las fachadas verdes también reducen la demanda de energía por sistemas HVAC hasta 16.5 % y mitigar la isla de calor urbana, UHI, hasta 5 °C en diferentes zonas climáticas. Recientemente, (Shrestha & Shimizu, 2021) señalaron que la absorbancia solar de las paredes con fachada verde es hasta 50 % menor con respecto a una pared desnuda, por lo tanto, se encontró una diferencia notable entre la temperatura interior y el ambiente exterior en presencia de radiación solar, además la absorción de calor de la pared verde fue 20 % más alta y la temperatura del recinto se mantuvo casi constante durante un mayor tiempo.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar la clasificación y selección de una fachada verde para clima cálido subhúmedo y analizar el efecto de incluir este sistema en un módulo de prueba experimental para observar el efecto que tiene sobre la temperatura del ambiente interior. Se presenta el diseño, desarrollo y los resultados obtenidos durante un periodo de análisis experimental de una semana de primavera en Cuernavaca, Morelos, ciudad representativa del clima Cwa de la clasificación climática de Köppen.

Medir la temperatura en un entorno experimental proporciona datos cuantitativos y observaciones concretas que permiten analizar de manera precisa el efecto de las fachadas verdes en la reducción de la temperatura de la pared exterior, la temperatura interior y la variación térmica a lo largo del día. Esto es esencial para comprender cómo estas fachadas pueden contribuir a mantener un ambiente interior más fresco en climas cálidos subhúmedos, lo que, a su vez, puede tener un impacto positivo en la calidad de vida de los ocupantes, así como en la eficiencia energética de los edificios.

En última instancia, el estudio experimental y la medición de la temperatura proporcionan datos concretos y fundamentales que respaldan la toma de decisiones informadas en el diseño y la implementación de fachadas verdes en este tipo de clima, lo que es esencial para avanzar hacia edificios más sostenibles y cómodos.

1.1. Clasificación de los muros verdes

Los sistemas de muros verdes se pueden clasificar de acuerdo con los medios de crecimiento, métodos de construcción y también por especies de plantas. Los sistemas de muros verdes se dividen en cuatro categorías como se presenta en la Figura 1. Los tipos de árboles establecidos contra la pared no son realmente sistemas de muros verdes, pero sus beneficios son los mismos (Köhler, 2008). Por otro lado, en los tipos enredaderas y/o trepadoras, que son comunes en la arquitectura tradicional, las plantas pueden cubrir las superficies de la pared directamente o usar enrejados para trepar. El uso de enredaderas y/o trepadoras es fácil, pero lleva tiempo cubrir todas las superficies de la fachada con vegetación. Los tipos colgantes están hechos por plantas con pedicelos largos en los balcones o en la parte superior de los edificios. Este tipo es algo entre el techo y los muros verdes y al utilizar el tipo de plantas colgantes en cada nivel de los edificios, todas las fachadas serán verdes en poco tiempo; Además, al usar diferentes tipos de plantas, la fachada será más colorida y visualmente atractiva. El último tipo es el modular, el cual consisten en vegetación plantada en cajas (módulos), que tiene un medio de crecimiento propio y se puede reemplazar fácilmente puesto que tienen tamaños no superiores a 1 metro. Últimamente es la técnica más usada, con plantas de crecimiento rápido, coloridas, diversas, atractivas y fáciles de reemplazar, ofreciendo así diferentes ventajas en el establecimiento de muros verdes modulares (Mir, 2011).

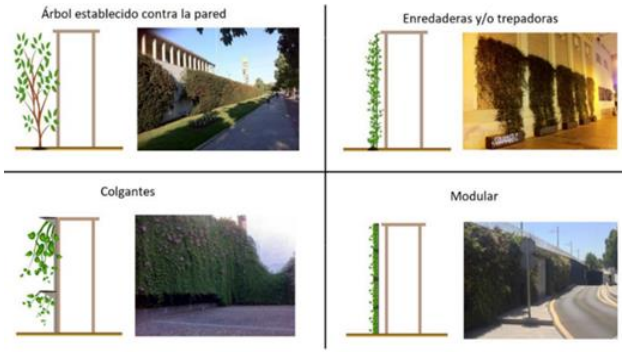


Figura 1. Clasificaciones muros verdes (Köhler, 2008).

2. Materiales y métodos

En esta sección se presenta la sección del tipo de vegetación, los requerimientos de riego, el sistema de recolección y registro de datos, el desarrollo del módulo de prueba y finalmente, la instrumentación equipo experimental.

2.1. Selección del tipo de vegetación

Seleccionar la vegetación adecuada para los sistemas de muros verdes es clave para la supervivencia de estos sistemas. Se requiere un estudio sobre la fenología de las plantas, el crecimiento y la forma en que se adaptan al medio ambiente para así decidir qué tipos de plantas son adecuadas en ciertos climas. Además, el sistema de riego, el mantenimiento y los métodos de instalación son otras razones que influyen en el rendimiento de los sistemas de muros verdes (Ávila, 2004). El índice de área foliar es un parámetro biológico el cual también se considera al momento de elegir una especie, así como también la distancia de plantación. Los criterios para medir la calidad de las plantas en sistemas de vegetación vertical son diferentes de una prueba a otra, y están relacionados con diferentes especies de plantas, tipos de muros verdes, sustratos, entre otros (Laurence et al., 2011)

Para este estudio se consideró la especie de planta ***Bignonia de Invierno*** o ***Llamarada Naranja*** con nombre científico ***Pyrostegia venusta.*** El género Pyrostegia pertenece a la familia de las Bignoniaceae y lo forman algo más de 15

ISSN: 2992-8338

especies de plantas trepadoras originarias de Brasil y el hemisferio sur. Este tipo de vegetación son arbustos trepadores de crecimiento rápido que pueden llegar a los 20 metros de altura si el clima lo permite. Son especies de hojas perennes, están formadas por tres foliolos, uno de los cuales es un zarcillo. Como se observa en la Figura 2, las abundantes flores naranjas se presentan en grupos terminales, tienen forma tubular con los pétalos vueltos hacia detrás. Florecen desde el otoño hasta inicios de la primavera siguiente. Se utilizan en exterior para cubrir muros y pérgolas, en macetas grandes para terrazas, en invernaderos y en jardines acristalados. La Bignonia de invierno necesita una exposición soleada o de semisombra; es capaz de prosperar a la sombra, pero producirá menos flores. Necesitan ayuda para trepar a base de soportes donde agarrarse. El suelo deberá ser ligero y algo ácido por lo cual se añade mantillo de hojas u otra materia orgánica. Tiene necesidades medias de agua. Son plantas resistentes que no suelen verse afectadas por plagas y enfermedades habituales en jardines (Jim, 2015).

Figura 2. Planta trepadora Bignonia de invierno o llamarada naranja.

2.2. Necesidades de riego

Las necesidades de riego dependen del tipo de sistema, plantas utilizadas y condiciones climáticas, pues son las variables para tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de irrigación para un muro verde y conociéndolas se puede alcanzar un alto grado de uniformidad de agua en toda la pared y reducir al mínimo las pérdidas de agua que sería el objetivo principal. Experimentos han demostrado cómo variables de diseño, goteros, espaciado de líneas de goteo, tipo de goteros y el flujo de cada uno de ellos, son importantes a la hora de construir un muro verde, también variables operacionales como la duración y frecuencia de riego, que se determinarán en función del tipo de muro verde y localización del muro verde. En este caso, las necesidades de riego de la fachada verde son 2 L de agua por cada planta en un periodo de riego de 72 h.

2.3. Sistema de recolección y registro de datos

En los últimos años con los avances de internet, ha aumentado la preferencia de disponer de control y de la información en nuestros dispositivos portátiles en cualquier parte del mundo. Hoy en día, muchos de los objetos que forman parte del mundo físico se pueden comunicar por medio de internet mostrando una determinada información y utilizando diferentes actuadores para controlarlo (Hunter et al., 2014). La filosofía de hardware abierto en analogía con el concepto de software abierto tiene como objetivo proporcionar acceso libre y transparente al diseño de hardware, proyectos y códigos para que los usuarios puedan compartir, personalizar y actualizar sus sistemas fácilmente (Lee et al., 2010). En este proyecto, se utilizó el microcontrolador Arduino.

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto ampliamente utilizada para la creación de proyectos electrónicos y programación. Consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, una interfaz de programación y un entorno de desarrollo que facilita la escritura de código para controlar diversos dispositivos y sensores. Sus ventajas principales incluyen su accesibilidad y facilidad de uso, lo que lo convierte en una excelente opción para principiantes y expertos por igual. En Arduino, tanto el hardware como el software son de código abierto (Banzi, 2016; Manzo y Castro-Gomez, 2015).

2.4. Desarrollo del módulo de pruebas experimentales

El montaje experimental consistió en dos módulos idénticos con dimensiones 1.2 m^3, con y sin fachada verde, como se presenta en la Figura 3. Los módulos están construidos de madera OSB (Oriented Strand Board, por las siglas en inglés) de espesor 0.018 m, con un recubrimiento de pintura blanca a base de aceite y una capa de esmalte para madera, con excepción de la cara de la fachada todas las demás tienen una capa de aislante térmico (Foamular) de 0.025 m de espesor, para reducir la pérdida de calor.

Figura 3. Módulos experimentales en el área de estudio.

Los módulos experimentales se colocaron en el techo del edificio principal en el Departamento de Ingeniería Mecánica campus CENIDET en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos (18°52’46’’N 99°13’17’’ O), con clima Cwa de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, ver Figura 4.

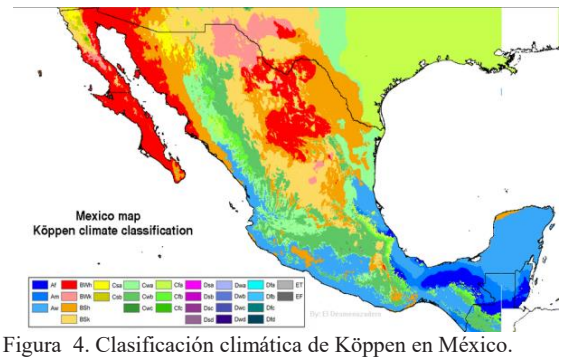


Figura 4. Clasificación climática de Köppen en México.

ISSN: 2992-8338

El clima Cwa es un tipo de clima subtropical húmedo con una estación seca de verano. Se caracteriza por temperaturas cálidas durante todo el año, con veranos calurosos y suaves inviernos. A pesar de la estación seca de verano, el clima Cwa recibe precipitaciones a lo largo del año, con una estación de lluvias en primavera y otoño. La humedad es alta, lo que favorece la vegetación exuberante, y este clima se encuentra comúnmente en regiones subtropicales de diferentes partes del mundo, por ejemplo: Sao Paulo (Brasil), Shanghái (China) y Brisbane (Australia) por mencionar algunas.

2.5. Instrumentación del sistema de adquisición de datos

Para medir la temperatura en las secciones de interés para el presente trabajo, se utilizaron termistores analógicos (TA-NTC10k), los cuales estaban distribuidos, como se muestra en la Figura 5, sobre la superficie de la pared exterior y a la mitad de la cavidad para medir la temperatura del ambiente interior.

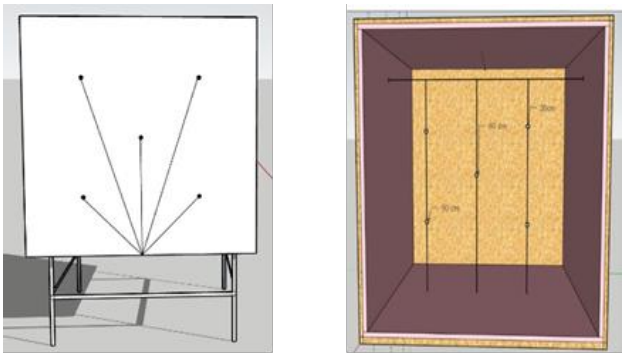


Figura 5. Distribución de los sensores de temperatura analógicos.

Por otro lado, para medir la temperatura sobre la superficie interior de la pared se utilizaron termistores digitales (TD-DS18B20), distribuidos como se observa en la Figura 6. Asimismo, para medir la temperatura sobre la vegetación también se utilizaron termistores digitales que están distribuidos como se muestra en la Figura 7.

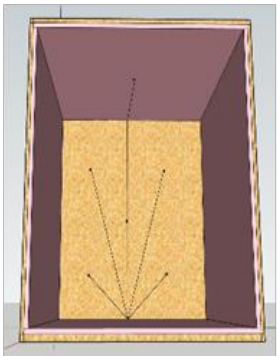


Figura 6. Distribución de los sensores de temperatura digitales.

Para medir la radiación absorbida por la vegetación, se colocó un piranómetro (Kipp & Zonen) montado verticalmente a un costado de la fachada verde, conectado a un dispositivo (Agilent) para la adquisición de datos en tiempo real. Las mediciones se realizaron en lapsos de tiempo de 60 s. Los datos de radiación solar, temperatura ambiente, humedad, velocidad de viento, dirección del viento, presión atmosférica y precipitación se obtuvieron cada 10 min a través de la estación meteorológica Vaisala Maws100 instalada a 20 m del área experimental.

Figura 7. Distribución de los sensores de temperatura sobre la vegetación.

3. Resultados y discusión

En este apartado se presenta el comportamiento de la temperatura en diferentes zonas del modulo experimental, estas zonas son: superficie exterior de la fachada, superficie intermedia, y superficie interior, durante un periodo de 144 h, es decir aproximadamente seis días de medición continua durante la temporada de primavera.

El estudio experimental y la medición de la temperatura en las fachadas verdes en climas cálidos subhúmedos son importantes por una razón fundamental: la temperatura es un indicador crítico del rendimiento térmico de los edificios y tiene un impacto directo en el confort de los ocupantes y en la eficiencia energética. Al centrarse en la temperatura, el estudio permite evaluar cómo las fachadas verdes influyen en la regulación térmica de los edificios en condiciones reales.

En la Figura 8, se presentan datos relevantes sobre las temperaturas de la pared exterior en ambos módulos, uno sin fachada verde (SFV) y el otro con fachada verde (FV), específicamente en un entorno de clima cálido subhúmedo. Estos datos revelan diferencias notables en el comportamiento térmico de las paredes exteriores entre los dos casos estudiados, lo cual es especialmente relevante para esta zona climática.

Se observa claramente que en el módulo sin fachada verde (SFV), las temperaturas en la pared exterior son significativamente más altas en comparación con el módulo equipado con fachada verde (FV). Esta disparidad se vuelve más evidente en presencia de radiación solar, entre las 10:00 h y las 14:00 h. Esto se debe al bloqueo de la radiación solar sobre la pared, lo que impide que esta absorba energía, aumente la temperatura interna y disipe calor por convección y radiación debido al contacto de la superficie con el aire al interior del módulo de prueba. En el tiempo de medición, el valor más alto de radiación solar fue 467 Wm^{-2} entre las 12:00 h y 14:00 h, mientras el valor más alto de temperatura del ambiente exterior fue 34 °C, bajo estas condiciones la

ISSN: 2992-8338

temperatura de la superficie exterior del módulo sin fachada verde fue 42.2 °C, mientras la superficie exterior del módulo con fachada verde fue 36.6 °C. Esta diferencia de temperatura se debe en gran medida a la contribución de la fachada verde, que actúa como un eficaz mecanismo de sombreado y refrigeración adaptado a las condiciones del clima cálido subhúmedo de la región.

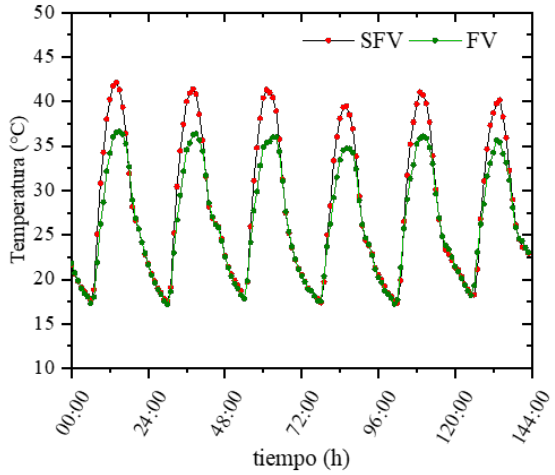


Figura 8. Comportamiento de la temperatura de la superficie externa de la fachada en ambos módulos de prueba, sin y con fachada verde.

En la Figura 9 se presentan los resultados del comportamiento de la temperatura en ambos módulos, en este caso la temperatura que registraron los sensores colocados en la superficie interior de la pared de análisis.

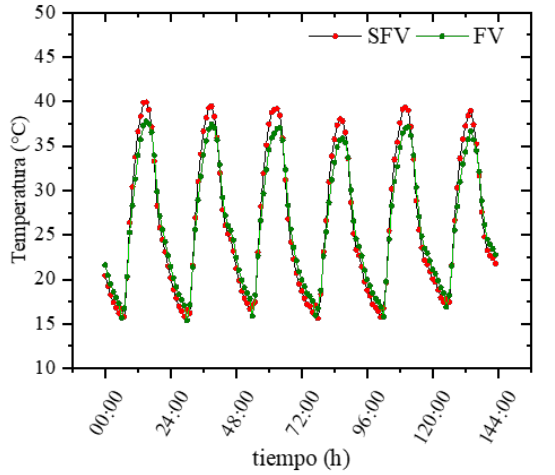


Figura 9. Comportamiento de la temperatura de la superficie interna de la fachada en ambos módulos de prueba, sin y con fachada verde.

De manera destacada, se observa que el módulo SFV experimentó temperaturas más elevadas, especialmente en el intervalo horario de 12:00 a 15:00. Esta diferencia en las temperaturas interiores entre los dos módulos resalta la contribución positiva de la fachada verde en la regulación del clima interno. El módulo FV exhibe una menor acumulación de calor en ese período, lo que sugiere que la fachada verde actúa como un eficaz sistema de enfriamiento pasivo en condiciones de clima cálido subhúmedo.

Por otro lado, en la Figura 10 se presenta el comportamiento de la temperatura del ambiente interior de ambos módulos experimentales. Como se esperaría, el módulo con la pared desnuda presentó la temperatura más alta, en 38.5 °C, mientras el módulo con la fachada verde presentó un valor máximo de temperatura de 36.4 °C.

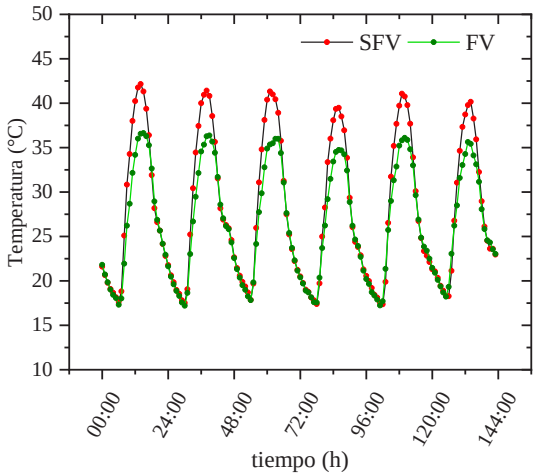


Figura 10. Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de los módulos experimentales con y sin fachada verde.

La eficacia de la fachada verde en un entorno de clima cálido subhúmedo se debe a un conjunto de factores ingeniosamente orquestados. Esta solución arquitectónica actúa como un escudo natural contra el calor, al proporcionar sombreado a la pared exterior y reducir la exposición directa a la radiación solar. La vegetación que la compone desempeña un papel clave al liberar humedad a través de la transpiración y la evaporación, enfriando así el aire circundante y manteniendo una atmósfera más fresca. Además, la fachada verde retiene la humedad en su capa de sustrato, que, junto con la reducción de la radiación solar directa gracias al follaje, contribuye a una disminución significativa de las temperaturas en el interior del edificio. En conjunto, estos elementos ofrecen una estrategia efectiva para mejorar el confort térmico y la eficiencia energética en climas cálidos subhúmedos, al tiempo que subrayan el potencial de la naturaleza para optimizar las condiciones ambientales de los espacios interiores.

4. Conclusiones

Con base en los resultados experimentales presentados en este trabajo, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los datos demuestran la notable eficacia de las fachadas verdes en la regulación térmica de los edificios en un clima cálido subhúmedo, como el de Cuernavaca, Morelos. La reducción de 6°C en la temperatura de la pared exterior, 3°C en la pared interior y 2°C en el interior de la cavidad destaca el

ISSN: 2992-8338

papel crucial que desempeñan las fachadas verdes para mitigar el calor y mejorar el confort en el interior del edificio.

- Los resultados respaldan firmemente la idea de que las fachadas verdes pueden considerarse un sistema pasivo eficiente de ahorro de energía en climas cálidos subhúmedos. Al reducir significativamente la temperatura interior, estas fachadas disminuyen la necesidad de sistemas de refrigeración activos, lo que puede conducir a un menor consumo energético y, en última instancia, a un ahorro económico.
- La adopción de fachadas verdes en la construcción puede contribuir al cumplimiento de objetivos de sostenibilidad al reducir la demanda de energía y las emisiones de carbono en edificios. Además, al mejorar las condiciones de confort térmico, las fachadas verdes pueden crear espacios interiores más habitables y saludables para los ocupantes.
- Estos resultados respaldan la recomendación de incorporar fachadas verdes en proyectos de construcción en climas similares a Cuernavaca, Morelos, como parte de una estrategia de diseño sostenible. La implementación de fachadas verdes puede ofrecer beneficios tanto económicos como ambientales a largo plazo.

En conjunto, los hallazgos sugieren que las fachadas verdes son una solución prometedora para mejorar el rendimiento térmico de los edificios en climas cálidos subhúmedos y que su uso merece una consideración seria en proyectos de construcción futuros en esta región.

Referencias

Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. Building and Environment, 70, 110-121.

Salazar, D.E. (2017). Diseño de jardines verticales en el interior de viviendas y la calidad de vida de los habitantes de la parroquia La Merced, Tesis de licenciatura, 205, Universidad técnica de Ambato facultad de diseño, arquitectura y artes carrera de diseño de espacios arquitectónicos.

Sánchez-Reséndiz, J. A., Ruiz-García, L., Olivieri, F., & Ventura-Ramos, E. (2018). Experimental assessment of the thermal behavior of a living wall system in semi-arid environments of Central Mexico. Energy and Buildings, 174, 31-43.

Tudiwer, D., Teichmann, F., & Korjenić, A. (2019). Thermal bridges of living wall systems. Energy and Buildings, 205, 109522.

Koch, K., Ysebaert, T., Denys, S., & Samson, R. (2020). Urban Heat Stress Mitigation Potential of Green Walls: A Review. Urban Forestry & Urban Greening, 55, 126843.

Daemei, A. B., Shafiee, E., Chitgar, A. A., & Asadi, S. (2021). Investigating the thermal performance of Green Wall: experimental analysis, deep learning model, and simulation studies in a humid climate. Building and Environment, 205, 108201.

Blanco, I., Vox, G., Schettini, E., & Russo, G. F. (2021). Assessment of the environmental loads of green façades in buildings: A comparison with un-vegetated exterior walls. Journal of Environmental Management, 294, 112927.

Shrestha, A., & Shimizu, T. (2021). Evaluation of the suppressive effects on solar radiation for a building façade covered with green layers in the Kathmandu Valley. Environmental Challenges, 5, 100246.

Susca, T., Zanghirella, F., Colasuonno, L., & Del Fatto, V. (2022). Effect of green wall installation on urban heat Island and building energy use: A climate-informed Systematic Literature review. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 159, 112100.

Köhler, M. (2008). Green facades—a view back and some visions. Urban Ecosystems, 11(4), 423-436.

Mir, M. (2011). Green facades and Building structures. TU Delft Repositories.

Ávila Alabarces, R. Tesis de Licenciatura,2004. Manual de Riego de Jardines. E. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.

Laurence M, Sabin R. (2011). Plant wall and modules for growing plants. Building and Environment 70, 110.

Jim, C. Y. (2015). Assessing growth performance and deficiency of climber species on tropical Greenwalls. Landscape and Urban Planning, 137, 107-121.

Hunter, A. M., Williams, N. S. G., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green façades: A Critical review. Ecological Engineering, 63, 102-113.

Lee A, Sian G, Greaves H. (2010). Green Wall System. WO 2010/009505 A1; 28 January.

Banzi, M.; Shiloh, M. Introducción a Arduino; O'Reilly media-Grupo Anaya s.a.: Madrid, Spain, 2016; p. 128.

Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green Wall Systems: A review of Their Characteristics. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 41, 863-871.

SOBERANÍA ALIMENTARIA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Optimizing mushroom production through automation in the town of Amealco de Bonfil: a sustainable approach

Martín Castillo Núñez, Agueda Ma. del Pilar Castillo González, Andrés Garduño Rosas, Guadalupe Abigail Hernández Trejo, Juan Carlos Silverio Chávez, Jorge Antonio Solís Peniche

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, 76800 San Juan del Río, Querétaro

ABSTRACT

The preliminary results of the "Seta Tech" project are shown, which seeks to implement technology to create optimal conditions in closed mushroom crops in the town of Amealco de Bonfil, Querétaro. The main objective is about strengthening food security and economic development in the region, addressing the common obstacles faced by traditional mushroom cultivation in the region; such as climatic fluctuations that affect humidity and temperature. The project aims to develop an automated, low-energy mushroom cultivation system that reduces dependence on external factors, improving production efficiency and, ultimately, improving the quality of life of family economic units in rural areas. from Amealco de Bonfil. This project is aligned with the United Nations Sustainable Development Goal No. 2, "Zero Hunger", and seeks to contribute to the reduction of malnutrition and food poverty in the region.
Keywords: mushroom cultivation, food security, food poverty, automation, Amealco de Bonfil, sustainability.

INTRODUCCIÓN

El proyecto "Seta Tech" se enfoca en la implementación de tecnología para crear condiciones óptimas en cultivos cerrados de setas en el municipio de Amealco de Bonfil, Querétaro. Este proyecto es relevante en la región debido a los obstáculos significativos que enfrenta el cultivo tradicional de setas; como factores externos impredecibles y las fluctuaciones climáticas, lo que conlleva a la ineficiencia en la producción y que repercute en la seguridad alimentaria y en el desarrollo económico de las familias. Amealco de Bonfil es un municipio ubicado en el estado de Querétaro, conocido por su belleza natural y diversidad de ecosistemas, incluyendo bosques de coníferas y encinas, que han propiciado la existencia de diversas especies de setas. La recolección de setas es una tradición arraigada en la comunidad, lo que contribuye a los ingresos de las familias locales. Sin embargo, las fluctuaciones en el clima agravan la problemática de cultivo de setas en la región que presenta altas tasas de desnutrición y pobreza alimentaria que se muestran en la tabla 1.

El proyecto "Seta Tech" busca abordar esta problemática, ya que la seguridad alimentaria y la autonomía económica son fundamentales para el bienestar de la comunidad. En un esfuerzo por fortalecer la autonomía alimentaria, "Seta Tech" tiene como objetivo desarrollar un sistema automatizado de cultivo de setas que reduzca la dependencia de factores externos, como el clima, y la humedad. Este enfoque tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia de producción y, en última instancia, coadyuvar a mejorar la calidad de vida de las unidades económicas familiares en Amealco de Bonfil. Aprovecha además el acceso a la materia prima (pastura o forraje de cultivos tradicionales) y la energía eléctrica con la que cuenta la población. Además, este proyecto se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible Nº 2 de las Naciones Unidas, "Hambre Cero", y busca contribuir a la reducción de la desnutrición y la pobreza alimentaria en la región.

Tabla 1. Datos de Amealco de Bonfil, Querétaro, CONEVAL.

Datos de Coneval Amealco de Bonfil, Querétaro (2020):
Desnutrición: 14,1%.
Pobreza Alimentaria: 27,2%.
Población: 66,841 habitantes.

Impacto del proyecto" Seta Tech" en la comunidad de Amealco de Bonfil.

El clima de Amealco de Bonfil oscila entre 1°C y 24°C, las setas precisan de temperaturas entre los 8 y 26 grados, los meses con temperaturas más altas son junio y julio, mientras los meses con más bajas temperaturas son de noviembre a marzo.

ISSN: 2992-8338

Los gobiernos y particulares han promovido esta técnica como una propuesta para propiciar la autonomía alimentaria, (ICAMEX, 1987), como ejemplo la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2019) brindó un apoyo de 218 mil pesos para capacitar a comunidades forestales de la Ciudad de México sobre la producción sustentable de setas como una alternativa de empleo. Uno de los motivos por los que las setas se han convertido en una opción para la autosuficiencia alimentaria es debido a que, en promedio, las setas del tipo Myscelus contienen alrededor de 2-3 gramos de proteínas por cada 100 gramos de peso fresco. Es importante tener en cuenta que este valor puede variar ligeramente dependiendo de factores como la madurez de las setas y las condiciones de cultivo específicas.

Si bien México ha presentado algunos avances en tema de seguridad alimentaria, según el índice Global de Seguridad Alimentaria (GFSI) 2022, es en la disponibilidad donde se tiene un menor desempeño al ubicarse en el lugar 54 a nivel mundial y el 10 de Latinoamérica. Esta problemática se debe entre otros aspectos a la cadena de suministro; es decir que no todos los alimentos producidos llegan a todas las personas, lo que provoca que existan zonas en donde hay población sin alimentos. Otro aspecto es lo referente al desarrollo de infraestructura agrícola, que permita mejorar el desarrollo de los alimentos. Por otra parte, en 2018, según el INEGI, 47% (16.2 millones) del total de los hogares en el país experimentaron alguna dificultad para satisfacer sus necesidades alimentarias por falta de dinero o recursos.

Investigaciones recientes, como el estudio de Fernández-Cruz et al. (2020), han explorado sistemas de cultivo cerrados para la producción de setas. Estos sistemas incluyen invernaderos controlados, compartimentos de cultivo herméticos y sistemas modulares adaptados a las necesidades específicas de las setas. Estos ambientes cerrados permiten un control más preciso de las condiciones de crecimiento y reducen la influencia de factores externos. La automatización en el cultivo de setas ha sido objeto de investigación en los últimos años. Un estudio realizado por Chen et al. (2021) proponen un sistema automatizado de cultivo de setas que utiliza tecnologías como la robótica, la visión por computadora y la inteligencia artificial. Este sistema automatizado es capaz de realizar tareas como la siembra, el riego, la recolección y el mantenimiento del cultivo de manera autónoma, reduciendo la necesidad de intervención manual.

El proyecto “Seta Tech” tiene el potencial de generar un impacto significativo en las zonas rurales de la comunidad de Amealco de Bonfil y en la sociedad en general. El impacto se traducirá en mejoras tanto sociales como económicas, abordando la seguridad alimentaria y promoviendo la autonomía económica de las familias en esta región. A continuación, se destacan los aspectos más relevantes del impacto esperado:

Generación de Empleo y autoempleo
La implementación de tecnología para el cultivo de setas requerirá la capacitación y participación de la comunidad local. Esto generará oportunidades de empleo, especialmente en términos de mantenimiento y operación de los sistemas automatizados, lo que contribuirá al desarrollo económico de la región.

Reducción de Costos y Desperdicio de Recursos
Los sistemas automatizados pueden reducir los costos operativos, la necesidad de intervención manual y la cantidad de recursos, como agua y energía física, necesarios para el cultivo. Esto no solo hace que la producción sea más eficiente, sino que también fomenta la sostenibilidad en el sector agroalimentario.

Producción de Calidad
La tecnología permite un control más preciso de las condiciones de crecimiento de las setas, lo que se traduce en una producción de calidad. El monitoreo constante y la capacidad de ajustar parámetros en tiempo real aseguran que las setas cumplan con los estándares de calidad deseados.

Autonomía Alimentaria
Al producir alimentos de manera independiente y constante, las familias de Amealco de Bonfil pueden lograr una mayor autonomía alimentaria. Esto significa que tienen un mayor control sobre sus fuentes de alimentos y no dependen en gran medida de suministros externos.

Reducción de la Pobreza Alimentaria
A medida que el proyecto “Seta Tech” contribuye a una mayor seguridad alimentaria y la generación de empleo en la comunidad, se espera que se reduzca la pobreza alimentaria en la región. La población tendrá un acceso más estable a alimentos nutritivos.

Contribución a la Sostenibilidad
El uso eficiente de recursos y la reducción de la huella ecológica son aspectos clave del proyecto. Al minimizar el desperdicio de recursos y reducir la necesidad de transporte de alimentos desde otras regiones, “Seta Tech” contribuye a la sostenibilidad ambiental.

Mejora en la Seguridad Alimentaria
Amealco de Bonfil se ha enfrentado a desafíos significativos en términos de seguridad alimentaria. Con tasas de desnutrición y pobreza alimentaria significativas, el proyecto “Seta Tech” abordará esta problemática al garantizar una producción constante de setas. Este alimento es rico en

ISSN: 2992-8338

nutrientes, puede ser una fuente valiosa de proteínas y minerales para la población

Reducción de la Dependencia de Factores Externos

El proyecto busca reducir la dependencia de factores externos como el clima y las condiciones impredecibles que afectan la producción agrícola tradicional. Al implementar sistemas automatizados de cultivo, "Seta Tech" asegura que las condiciones óptimas se mantienen independientemente del entorno, garantizando una producción estable y constante.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se siguieron los pasos mostrados a continuación:

Recopilación de Requisitos

La primera fase del proyecto c*onsis*tió en analizar el proceso de cultivo de setas para identificar los factores críticos que le afectan, en particular, la temperatura, la humedad y la inocuidad como se muestran en la Ilustración 1. Esto incluyó la revisión de la memoria técnica existente y la consulta de expertos en el campo.

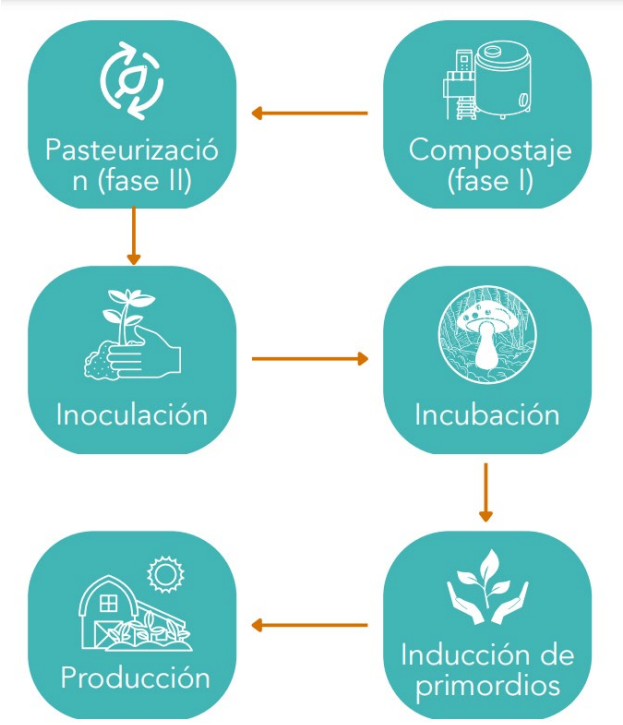


Ilustración 1. Proceso de cultivo de setas.

Una vez recopilados los requisitos, se realizó un análisis de las necesidades específicas del sistema. Se definieron los parámetros óptimos para el cultivo, como la temperatura y la humedad, que debían mantenerse constantes para maximizar la producción, estas se muestran a continuación:

Temperatura Ideal 20 °C – 28 °C.

Para la etapa de fructificación temperaturas entre 18 °C – 25 °C.

Humedad en sustrato y relativa 60% – 80%.

Con los requisitos y análisis en su lugar, se procedió al diseño del prototipo del sistema de automatización. Esto incluye la selección de componentes electrónicos, la disposición del sistema de control climático y riego, y la creación de una estructura que albergaría tanto el cultivo como la circuitería electrónica necesaria, que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Tecnología implementada.

Equipo	Especificaciones
Tarjeta De Desarrollo	Tarjeta De Desarrollo Esp32 Con Módulo Wifi Compatible Con Python Y Arduino Ide
Sensor De Temperatura Y Humedad Dht11	Sensor Digital De 3 Pines Funciona A 5v Y Un Tiempo De Respuesta De 1s
Pantalla Lcd 16x2	Pantalla Lcd Compatible Para La Tarjeta Esp Con El Propósito De Mostrar Datos
Módulo 4 Rele	Módulo Diseñado Para Ser Controlado Digitalmente Y Poder Activar Elementos De Potencia
Fuente Conmutada	Fuente De Poder 12v 30a A Cargo De Alimentar Todos Los Elementos Eléctricos
Pulverizador Ultrasónico	Sistema De Ultrasonido Que Pulveriza Partículas De Agua Sin Elevar Su Temperatura
Celda Peltier	Una Célula Peltier Es Un Dispositivo Electrotérmico Que Permite Generar Frío A Partir De La Corriente Eléctrica.
Sistema De Refrigeración	Propicia Una Circulación Continua De Agua Para Disipar El Calor Generado En Los Componentes Electrónicos.
Tanque Agua	Reservorio Para Sistema De Riego.

ISSN: 2992-8338

Base De Datos	Acceso A Un Dominio Web Donde Se Almacenan Los Datos Recopilados Y Se Muestran De Forma Remota.
Caja Equipo Electrónico	Caja 20x50x40cm Donde Se Almacena El Equipo Electrónico.
Caja Cultivo	Caja 60x50x40cm Donde Se Almacenarán Los Costales Sembrados De Seta.

Se desarrolló un programa de control que permite la automatización del proceso de monitoreo y control del cultivo. El software fue diseñado para funcionar de manera autónoma y permitir ajustes en tiempo real según los datos recopilados. En la Ilustración 2 se observa un diagrama de flujo que muestra la secuencia de programación.

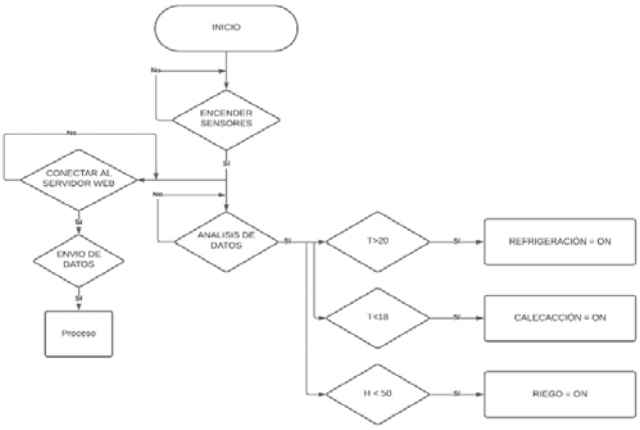


Ilustración 2 – Diagrama de flujo que muestra la secuencia de programación.

El prototipo está siendo sometido a pruebas en un entorno controlado para evaluar su funcionamiento y asegurar que todos los componentes estuvieran interconectados y operando de manera efectiva. En las ilustraciones 3 y 4 se comparan los datos obtenidos.

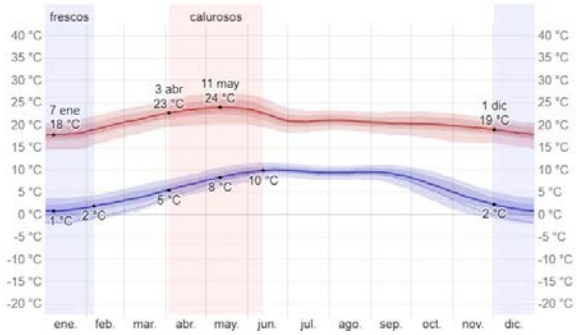


Ilustración 3 – Clima de Amealco de Bonfil. Tomado de weatherspark.com

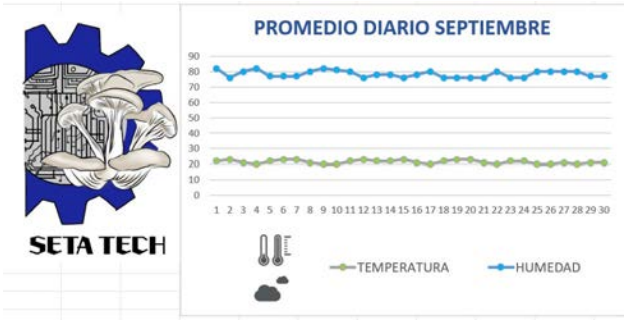


Ilustración 4 – Variables de temperatura y humedad septiembre 2023.

Posteriormente, se llevarán a cabo pruebas de campo para evaluar el desempeño del sistema de automatización en un entorno de cultivo real. Se monitorearán las condiciones ambientales y se compararán con un método de cultivo tradicional.

Se recopilarán datos durante un período de tiempo para comparar la eficiencia y el rendimiento del sistema de automatización con los métodos de cultivo tradicionales, considerando factores como la calidad y cantidad de la producción, la eficiencia en el uso de recursos y la estabilidad de las condiciones de crecimiento.

RESULTADOS DEL PROYECTO SETA TECH EN EL CULTIVO DE SETAS

Ilustración 5 - Prototipo funcional.

Desarrollo del Prototipo y su Funcionalidad

El proyecto ha avanzado en el desarrollo del prototipo del sistema de automatización en cultivos de setas, la creación de una base de datos, el desarrollo de una aplicación móvil, pruebas en entorno controlado, diseño y programación final, y

ISSN: 2992-8338

la formación de recursos humanos, como se muestra en la Ilustración 5.

PRODUCTO

El producto desarrollado como parte del proyecto "Seta Tech" es un sistema automatizado de cultivo de setas, como se muestra en la Ilustración 6. Este sistema consta de varias características técnicas, como el monitoreo y control de la temperatura, humedad en sustrato y ambiente.

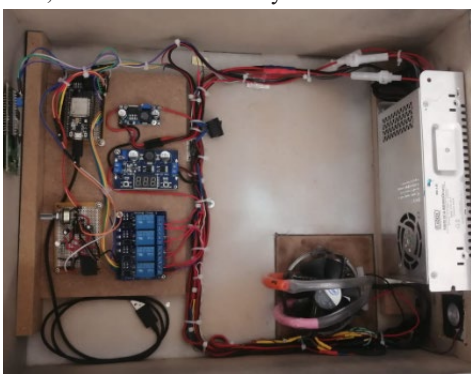


Ilustración 6 - Sistema para el cultivo de setas.

Se ha desarrollado una base de datos y una aplicación móvil para el monitoreo remoto y control del sistema, se muestra en la Ilustración 7, así mismo con el propósito de obtener información cuantificable de las variaciones climáticas a lo largo del proceso de producción de las setas.

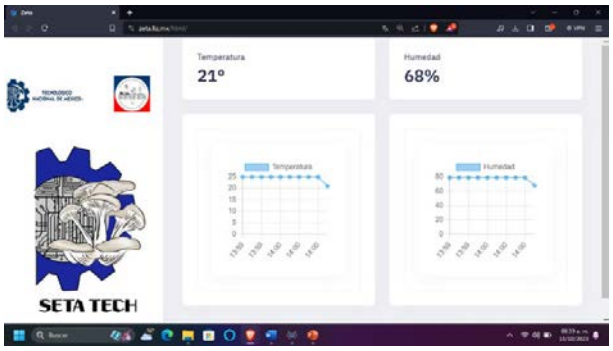


Ilustración 7 - Base de datos y aplicación móvil.

PRESUPUESTO

Tabla 3. Presupuesto.

El siguiente presupuesto es el costo de inversión del prototipo que se muestra para el cultivo de setas.

CONCEPTO	**MONTO**
MATERIAL ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO.	$ 4,916.96
REFACCIONES Y ACCESORIOS DE CÓMPUTO Y TELECOMUNICACIONES.	$ 1,733.04
FABRICACIÓN PROTOTIPO.	$ 5,000.00

CONCLUSIONES

El proyecto Seta Tech es una propuesta dirigida hacia la seguridad alimentaria participando así del objetivo del desarrollo sostenible "hambre cero".

Lecciones Aprendidas y Desafíos Enfrentados: A lo largo del proceso de implementación, se han adquirido valiosas lecciones. Estas incluyen la importancia de la investigación exhaustiva, la selección de tecnología adecuada y la necesidad de contar con un equipo multidisciplinario. Se han superado desafíos técnicos en la programación del sistema y la interconexión de dispositivos, lo que ha fortalecido aún más la capacidad del equipo para abordar futuros proyectos tecnológicos con confianza.

Próximos Pasos y Recomendaciones: Para la continuación del proyecto Seta Tech, se propone una serie de pasos y recomendaciones clave:

Realizar pruebas adicionales y ajustes finales en el sistema para garantizar su estabilidad y eficiencia en condiciones de cultivo reales. Esta es una etapa crítica antes de la adopción a gran escala.

Escalar el proyecto a nivel local, involucrando a agricultores y comunidades para promover su adopción y maximizar su impacto en la región.

Buscar financiamiento adicional para la producción a gran escala y la comercialización del sistema automatizado, lo que permitirá llevar la tecnología a un público más amplio.

Continuar con la capacitación y formación de recursos humanos en el uso y mantenimiento del sistema, asegurando su sostenibilidad a largo plazo.

REFERENCIAS

CONAFOR (2019). La CONAFOR capacita a Ejidos para producir hongo seta. gob.mx. https://www.gob.mx/conafor/prensa/la-conafor-capacita-a-ejidos-para producir-hongo-setas

Estadísticas a propósito del día mundial de la alimentación Datos Nacionales. Recuperado 21 de julio de 2023, de

ISSN: 2992-8338

https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/eapalimentacion. pdf

Fernández-Cruz, F., et al. (2020). Sistemas de cultivo cerrados en el cultivo de hongos. Industria agroalimentaria de alta tecnología, 31(5), 43-45.

Global Food Security Index (GFSI). (2022). https://impact.economist.com/sustainability/project/food-security-index/ · INEGI. (2020, 16 octubre).

Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal. (s. f.). cultivo de hongos. ICAMEX. Recuperado 21 de julio de 2023, de http://icamex.edomex.gob.mx/cultivo_hongo_seta

Instituto Nacional de la Economía Social. (2023.). Nodos de Impulso a la Economía Social y Solidaria NODESS. gob.mx. https://www.gob.mx/inaes/acciones-y programas/nodos-de-impulso-a-la-economia-social-y-solidaria-nodess-233732

L Chen, X., et al. (2021). Sistema Robótico para el Cultivo de Hongos. Revista Internacional de Ingeniería Agrícola y Biológica, 14(5), 48-53.

Li, J., et al. (2020). Internet de las cosas para el cultivo de hongos: una revisión. Informática y Electrónica en Agricultura, 177, 105744.

Secretaría de Bienestar. (2019). Cultivo de setas, una actividad agrícola con potencial. gob.mx. https://www.gob.mx/bienestar/articulos/cultivo-de-setas-una actividad-agricola-con-potencial? idiom=es

Wang, Y., et al. (2019). Desarrollo de un Sistema de Climatización para el Cultivo de Hongos Comestibles. Computadoras y Electrónica en Agricultura, 162, 1027-1034.

ISSN: 2992-8338

Experimental tests for pecan nut shelling using a pneumatic prototype

Y. Ventura-González*, J. Reyes-Reyes*, J. Arce-Landa*

Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S.N., Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. CP 62490 MÉXICO (Tel. 7773627770; correo electrónico: m22ce039@cenidet.tecnm.mx, juan.rr@cenidet.tecnm.mx, jesus.al@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: This paper shows the experimental tests carried out with a pneumatic prototype for shelling pecan nuts from their endocarp. The prototype consists mainly of a hermetic chamber and different accessories (connections, valves, pressure gauges and a pneumatic compressor as a power source). The shelling process is carried out through the following 5 steps or working conditions: (1) first, the nut is introduced into the chamber. At this point the chamber pressure (P_{cam}) is equal to the internal pressure of the nut (Pnut), and this in turn is equal to the atmospheric pressure (P_{atm}), i.e., $P_{cam} = P_{nut} = P_{atm}$. The second step (2) consists of supplying air to the chamber through the inlet valve at a preset pressure, this allows Pcam to be increased. This 2nd pressure condition can be expressed as, Pcam $>$ $P_{nut} = P_{atm}$. The third step (3) is to reach equilibrium conditions between the chamber pressure and the internal pressure of the nut, i.e., Pcam = $P_{nut} > P_{atm}$. During the fourth step (4) the air outlet valve is abruptly opened, allowing the chamber pressure to vent and equalize with the atmospheric pressure, leaving the nut pressurized. The above condition is expressed as: $P_{cam} < P_{nut} >$ Patm, which results in the rupture of the endocarp. The process ends in the fifth step (5), where the pressures $P_{cam} = P_{atm}$ are equalized, and Pnuez disappears. The results obtained show collapsed endocarps (32.7%), cracked endocarps (36.4%) and endocarps without any damage (30.9%). A total of nine experiments were carried out, in groups of 5 to 10 pieces of nuts each. The working pressure range was from 0 to 120 PSI, and the pressure supply profile to the chamber was stepwise with equilibrium times of 1 minute.

Keywords: pneumatic system, pressure differences, pecan nut, endocarp, shelling.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace mucho tiempo, el ser humano ha introducido diferentes frutos secos a su dieta alimenticia, como por ejemplo la nuez en sus diferentes variedades (pecana, avellana, castilla, entre otras), el cacahuate, los pistachos y las almendras, entre otros. La composición grasa de los frutos secos, su contenido en antioxidantes, su fibra y otras sustancias bioactivas, proporciona un gran valor nutricional (M. José González, 2008).

México es uno de los principales exportadores de Nuez Pecana (*Carya Illinoinensis*) sin cáscara, ya que el promedio de las exportaciones promedio de esta Nuez fue de 50 mil toneladas en el lapso de 2016 a 2020, siendo el estado de Chihuahua el de mayor producción. Esta gran producción que se tiene en México lo coloca como el primer productor a nivel mundial y el segundo proveedor a nivel internacional (Rural, 2021).

Actualmente, la sociedad civil es más estricta en cuestión de calidad al momento de adquirir un producto comestible. En México el consumo de nuez pecana per cápita es de 0.9 kg, Smattcom, (2019). Es por ello que se han hecho diferentes estudios para obtener un producto de mayor calidad en cuanto al proceso de descascarado. Debido a la alta demanda en el consumo que existe hoy en día, se ha tenido que recurrir a distintos métodos, dado que las tecnologías de procesamiento tradicionales son inadecuadas para cumplir los estrictos requisitos de los productos de nuez (Mingzheng *et al.* 2021). Dos de los métodos industriales utilizados con frecuencia son; el método de extrusión y el método de impacto. El primero consiste en ajustar los rodillos al tamaño de la nuez, para posteriormente ejercer la fuerza necesaria de ruptura; se determinó la rigidez de la cáscara en diferentes posiciones, la fuerza interna y la deformación de la cáscara de nuez mediante la extrusión, el resultado mostró, que donde se centran las fuerzas es el punto de ruptura, se evaluaron algunos puntos críticos, como el ángulo de compresión, el ángulo de extrusión se determinó que hay un margen del ángulo para que la nuez entre en el espacio de extrusión $0° < \alpha \leq 44°$, cuando el rodillo exprimidor superior está a 23 mm del rodillo inferior, la cáscara se agrieta cuando $\alpha = 20°$ y se rompe cuando $\alpha = 15°$ (Liu *et al*., 2016).

ISSN: 2992-8338

El segundo método (el método de impacto), consiste en aplicar la fuerza de ruptura a través de un punzón, o bien a través de un disco con paletas, que gira a grandes velocidades, en donde la nuez se impacta contra las paredes de un cilindro; se diseñaron estructuras de cabeza de martillo de diferentes formas de contacto de carga, se investigó mediante efectos la rotura del endocarpio, así mismo se evaluó la tasa de rotura de la cáscara y la tasa de daño a la nuez, se demostró que la cabeza del martillo en forma de ranura, puede reducir la influencia del factor de dirección de carga en el efecto de rotura del casco, esta estructura puede actuar como guía de grietas, con el aumento de números de alvéolos, las grietas se distribuyen mejor y mejora la calidad de ruptura del endocarpio, el mejor número de ranuras fue de 7 en donde se obtuvieron los resultados más satisfactorios, lo que género una taza de ruptura de la cáscara del 98.9% clasificando grietas de primer y segundo grado y una tasa de daño del 5.7% en las nueces (Chengmao *et al.,* 2016).

Algunos aspectos importantes que se deben de tomar en cuenta para el descascarado por medios mecánicos son, la magnitud, la dirección, y la velocidad de carga, el contenido de humedad y el grosor de la cáscara de nuez (Mingzheng *et al.,* 2021).

Antes de aplicar los métodos de descascarado, anteriormente descritos, el producto comestible de la nuez debe de pasar por un proceso de limpieza, eliminación de la cáscara verde, la calibración de humedad, una clasificación previa por tamaño. Esta clasificación puede ser manual y/o automática; mediante cámaras inteligentes, usando mesas de clasificación, entre otros. Finalmente, y posterior a la ruptura del endocarpio, el producto final de la nuez (núcleo) es clasificado y envasado o almacenado de acuerdo a su tamaño.

Una característica de los medios mecánicos es su capacidad de procesamiento, es decir, la cantidad de nueces que se pueden procesar en un tiempo determinado; Para el procesamiento de nueces se han desarrollado en el mercado diversas tecnologías y equipos modernos para la recolección y procesamiento de nueces, la ventaja que ofrecen algunas máquinas es que son universales y pueden adaptarse a varias frutas de las semillas de las nueces (Dumitru*, et al.,* 2022)

Por otra parte, se han obtenido relaciones entre las propiedades mecánicas y la microestructura de diferentes nueces y almendras. Se realizó un estudio a 3 diferentes nueces y 4 tipos de almendras, caracterizadas por cáscara dura y cáscara blanda, en la cual se buscó una relación entre microestructura y propiedades mecánicas. Mediante tres técnicas, ensayos de impacto Charpy, microscopía electrónica de barrido (SEM)y técnica de excitación por impulso (IET). La relación hay entre geometrías densas/porosas con respecto a la resistencia mecánica: la capacidad para soportar esfuerzos parece incrementar con geometrías densas y disminuir con geometrías porosas, Astete (2019).

Los diferentes métodos aplicados para el descascarado del endocarpio deben de contemplar propiedades y características relevantes de la nuez, las cuales deben de tomarse en cuenta al momento de diseñar y construir una máquina y/o un mecanismo manual, aunado a mejorar la calidad y cantidad de semillas descascaradas como variables importantes del proceso.

Para el área del comercio, los parámetros más importantes son; la capacidad de producción y el precio del equipo, mientras que para el consumidor los parámetros equivalentes son la calidad y el precio del producto comestible final.

De acuerdo con Petrov (2015) existen otras técnicas de descascarado no del todo exploradas, de las cuales se tiene poca información. Entre estos métodos/técnicas se pueden mencionar las siguientes:

(i) Se somete la nuez a una presión negativa (vacío).
(ii) Se aplica presión positiva de aire a través de una perforación.
(iii) Se adhieren grandes cantidades de partículas ferromagnéticas, y posteriormente colocar la nuez en un campo magnético intenso.
(iv) Sé coloca la nuez en un recipiente hermético, se aplica aire a presión, se deja un tiempo para equilibrar presiones, y se retira la presión abruptamente, de esta manera la presión dentro de la nuez será mayor que el exterior y el endocarpio se partirá (Método de diferencial de presiones).
Esta última técnica es la que se aborda en este artículo. La importancia y la motivación de este estudio es para reforzar las partes en las que todavía hay mucha área de oportunidad.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Para aplicar el método de diferencial de presiones (MDP), fue necesario definir condiciones de trabajo con que debería de cumplir el sistema neumático y la población de muestras para distintos ensayos experimentales. El método consiste en someter a la nuez a un alto diferencial de presión dentro de una cámara hermética, el cual se describe en los siguientes 5 pasos o condiciones de trabajo:

Condición 1. Se introduce la nuez al interior de la cámara. En este momento la presión de la cámara (P_{cam}) es igual a la presión interna de la nuez (P_{nuez}), y esta a su vez, es igual a la presión atmosférica (P_{atm}), i.e., $P_{cam} = P_{nuez} = P_{atm}$.

Condición 2. Se suministra aire presurizado a la cámara a través de la válvula de entrada a una presión preestablecida, y en un tiempo preestablecido, esto permite incrementar P_{cam}. Esta 2da condición de presión se puede expresar como, $P_{cam} > P_{nuez} = P_{atm}$.

Condición 3. En un tiempo preestablecido, se alcanzan *condiciones de equilibrio* entre la presión de la cámara y la presión interna de la nuez, es decir, $P_{cam} = P_{nuez} > P_{atm}$.

Condición 4. Se abre de manera abrupta la válvula de salida de aire, permitiendo que la presión de la cámara se desfogue e iguale con la presión atmosférica, quedando la nuez

ISSN: 2992-8338

presurizada. La condición anterior se expresa como: $P_{cam} < P_{nuez} > P_{atm}$, lo cual da como resultado la ruptura del endocarpio.

Condición 5. El proceso termina en el quinto paso (5), en donde se igualan las presiones $P_{cam} = P_{atm}$, y desaparece la presión P_{nuez}.

En la Figura 1, se muestran, de manera esquemática, los pasos con los cuales se lleva a cabo el proceso de descascarado para la *nuez pecana*.

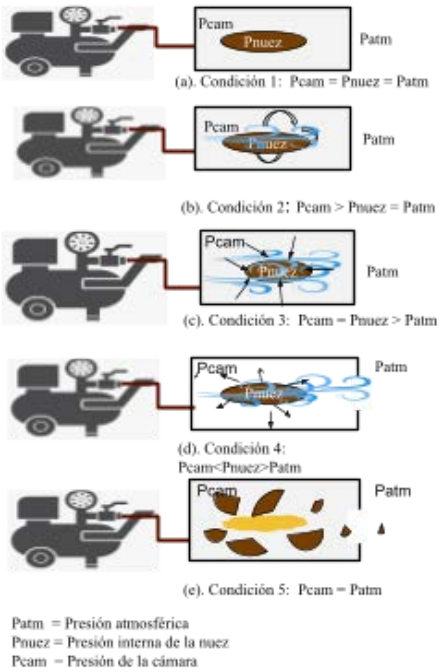


Figura 1. Proceso de descascarado de la nuez pecana.

El tiempo de presurización es aquel donde se introduce la presión a la cámara. El tiempo de equilibrio es aquel donde la presión de la cámara y la presión de la nuez se igualan.

Para aplicar presión a la cámara, se puede hacer de dos formas: (1) De forma lineal con pendiente variable, y (2) de forma escalonada con pasos de tiempo preestablecidos. En la Figura 2 se muestran los perfiles de las presiones y los tiempos de equilibrio.

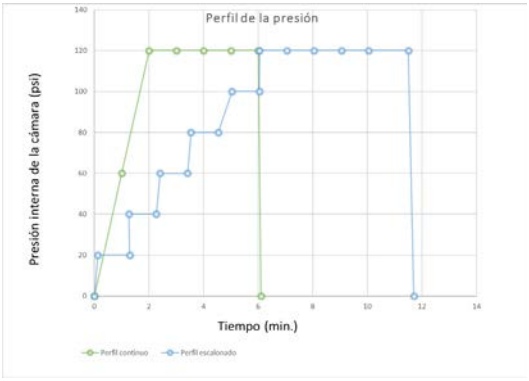


Figura 2. Perfiles de tiempo.

Los materiales con los que está construido el sistema fueron seleccionados de acuerdo con las propiedades mecánicas requeridas por los intervalos de presión de trabajo.

Tabla 1. Materiales que integran el sistema neumático.

Elemento/Material	Capacidad de diseño (psi)
(1) Cámara hermética (Acero)	250
(1) Compresor (Acero)	125
(3) Válvulas de entrada/salida de aire (Acero)	250
(1) Indicador de presión (Aleación/Bronce)	200
Conexiones especiales (Acero)	250
Tubería neumática (PVC/Acero)	250

En la Figura 3. Se presenta el circuito neumático del sistema neumático.

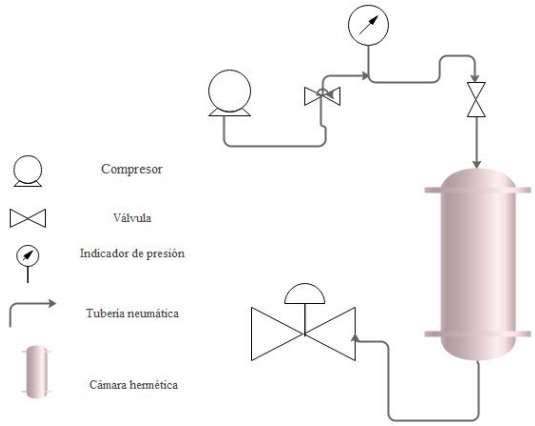


Figura 3. Circuito neumático.

ISSN: 2992-8338

3. RESULTADOS

Los ensayos experimentales se realizaron con diferentes tiempos de equilibrio para encontrar el tiempo adecuado de mejor éxito. Para una presión de 120 psi el mejor tiempo de equilibrio fue de 5 minutos. En los ensayos experimentales, se tomó una población de 60 nueces (de diferentes zonas de producción). Se formaron grupos de 10 y 5 piezas.

A continuación se muestran los parámetros de los experimentos realizados y las condiciones con las que se llevaron a cabo, ver Tabla 2. Estos resultados se etiquetaron con su respectiva nomenclatura.

Tabla 2. Características de los experimentos realizados.

Cantidad (pzas)	Presión de trabajo (psi)	Tiempo de presurización (min)	Aplicación de la presión	Resultado
10	90	10	Perfil 1	s/c
10	95	10	perfil 2	s/c
5	110	5	perfil 1	1 c, 2 a, 2 s/c
5	110	10	perfil 2	2c, 2a, 1s/c
10	110	10	perfil 1	3c, 3a, 4 s/c
10	120	5	perfil 1	2c, 5a, 3 s/c
10	120	10	perfil 2	4c, 3a, 3 s/c
10	120	10	perfil 2	4c, 3a, 3 s/c
5	120	10	perfil 2	2c, 2a, 1 s/c

Donde c= colapsado, a= agrietado y s/c = sin cambios.
Perfil 1. Aplicación de presión de manera rápida
perfil 2. Aplicación de la presión de manera escalonada

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que las presiones de trabajo de 90 y 95 psi, no tuvieron efecto significativo alguno sobre el endocarpio. Se comenzaron a ver efectos favorables sobre el endocarpio a partir de 110 psi, como grietas en algunas nueces y colapsos en otras.

Contemplando el total de piezas a partir de la presión con la que se comenzaron a ver resultados, son 55 piezas con las que se pudieron apreciar efectos positivos, de las cuales, un 32.7% colapsaron, el 36.4% se agrietaron y un 30.9% s/c no les sucedió nada. Es decir, el 69.1% de las nueces sufrieron algún efecto positivo en su endocarpio mediante la aplicación de esta técnica.

En las Figuras 4-6 se observan algunas muestras, después de pasar por el proceso de descascarado.

Figura 4. Nuez colapsada.

Figura 5. Muestra de nueces después del proceso.

Figura 6. Muestra después del proceso en el interior del prototipo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Separar la nuez de su endocarpio por medios neumáticos resulta algo muy favorable. En este método no importa el tamaño ni la posición de la nuez en que se encuentre durante el proceso.
- La aplicación de este método de separar la semilla de su endocarpio, puede ser una gran oportunidad de mejorar el descascarado de la nuez, desplazando a los métodos tradicionales.
- Se recomienda que para tener porcentajes de descascarado más altos, se utilice mayor presión de trabajo y un dispositivo neumático de mayor capacidad.
- Al utilizar altas presiones, como es el caso, se recomienda utilizar equipo y guardas de seguridad, con la finalidad de evitar accidentes de trabajo.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), (2021) *México segundo exportador mundial de nuez pecanera sin cáscara*. https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-segun do-exportador-mundial-de-nuez-pecanera-sin-cascara?i diom=es.

ISSN: 2992-8338

Chengmao, C., Lan, J., Chongyou, W., Zheng, L., Tianyu, W., & Ran (2017) "Design and Test on Hammerhead of Pecan Shell-breaking Machine", *Chinese Society for Agricultural Machinery (CSAM) and Chinese Academy of Agricultural Machinery Sciences (CAAMS).* . doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.039.

González Corbella, M. J. (2008) "Frutos secos. Análisis de sus beneficios para la salud", *Ámbito farmacéutico nutricional*, 27(5), pp. 100–107. Disponible en: https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-frutos-secos-analisis-sus-beneficios-13120524.

Julian Dumitru, 1.Florín NENCIU,1.Valentin Vladut,Julián Voz,.Remus Oprescu,.Gabriel Ciprián Telibán,.Marga Gradilá (2022) "Equipos y tecnologías utilizadas en el proceso de la nuez", *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering* , 21 febrero. Disponible en: https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2022/ANNALS-2022-2-21.pdf.

Changhe Li, Yanbin Zhang, Dongzhou Jia, Min Yang, Yali Hou, MZ Liu (2016) "Análisis de prueba de rendimiento de descascarado de cáscara de nuez de extrusión por cizallamiento con correa flexible", *Ingeniería Aplicada en Agricultura.*, agosto, p. 32(4): 459-467.

México, productor y exportador mundial de nuez (2019) *Comercio inteligente para el agro (SMATTCOM)*. Disponible en: https://smattcom.com/blog/mexico-productor-y-exportador-mundial-de-nuez.

Mingzheng, L., · Changhe, L., Chengmao, C., Liqiang, W., Xinping, L., Che, J., Huimin, Y., Xiaowei, Z., Huayang, Z., Guangzan, H., & Xiangdong, L. (2021) "Equipos de procesamiento de frutas de nueces: conocimientos y perspectivas académicas", *Springer Science.* doi: 10.1007/s12393-020-09273-6.

Mingzheng, L., Changhe, L., & Yanbin, Z. (n.d.). (2016) "Equipos de corte, extrusión, descascara, trilla flexible y extracción de granos de nueces", *CN China*.

Petrov, V. (2015) *Fundamentos De La Teoria Para La Solución De Los Problemas Inventivos (TRIZ)*. En Kindle Scribe. Disponible en: https://a.co/d/8tuNVvs.

Sánchez, V. Y. A. (2019) *Caracterización microestructural y mécanica de cáscaras de nueces*.

Yang, Mingzheng., Liu· Chang,. He Li·, Chengmao Cao·, Wang Liqiang·, Xinping Li·, Ji Che· Huimin (2020) "Equipos de procesamiento de frutos de nuez: conocimientos y perspectivas académicas", *Revisones de ingeniería en alimentos*.

ISSN: 2992-8338

Proposal: Real-time analysis system for vineyards

Vargas-Amézquita, Tamara A.[*], González-Lorence, Armida[**], Morales-Morales Cornelio[****]

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Ave. Tecnológico No.2, CP. 76800. San Juan del Río, Querétaro, México. (e-mail: m23590621@sjuanrio.tecnm.mx, armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx, cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx).*

Abstract: This paper proposes a system for monitoring and controlling vineyards using IoT technology. Viticulture is an activity that is increasingly incorporating technology to optimize production. In this context, a system is proposed with the use of ESP32-Cam microcontrollers to monitor temperature, humidity, gases, and the presence of pests in vineyards. The data collected is sent to a third ESP32 microcontroller, which analyzes it and stores it in a local database. In addition, the information is published on a dashboard accessible to users through the MQTT protocol. It mentions the importance of viticulture in Mexico, especially in regions such as Querétaro, where red grape varieties are produced. It is emphasized how heat stress can affect the production of anthocyanins in grapes, which influences the color of red wine. The challenges in viticulture, such as natural diseases and pests that can affect vineyards, are discussed. The system proposal includes microcontrollers, sensors (temperature, humidity, gases, movement), actuators (LEDs, buzzers, buttons), a database, and a central server. This allows for constant and real-time monitoring of the vineyard conditions, saving resources and improving grape quality. It also reduces environmental impact by making informed decisions. The objective of the proposal is to present an effective and economical system for monitoring and controlling vineyards, using IoT technology to address the challenges in viticulture and improve grape production.

Keywords: Crop monitoring, Viticulture, Temperature, Humidity, Pests, Internet of Things (IOT).

1. INTRODUCIÓN

La viticultura es una actividad agrícola que requiere de un cuidado y atención constante para garantizar la calidad y productividad de los cultivos. En los últimos años, la tecnología ha ido ganando terreno en el campo agrícola, permitiendo el desarrollo de sistemas de monitoreo y control que automatizan tareas y optimizan los recursos.

Para lo cual se propone un sistema de monitoreo y control de cultivos de vid basado en microcontroladores ESP32-Cam. El sistema utiliza dos microcontroladores ESP32-Cam para monitorear la temperatura, humedad, gases y presencia de plagas en el cultivo. Los datos recopilados por los microcontroladores son enviados a un tercer microcontrolador ESP32, que los analiza y almacena en una base de datos local. La información se publica también en un dashboard mediante el protocolo MQTT, para que sea accesible y entendible para el usuario.

2. ANTECEDENTES

Según el libro “La Industria Vitivinícola Mexicana en el siglo XXI” (Vázquez et al., 2022), en México destacan cuatro entidades en la producción de vino: Baja California, Coahuila, Querétaro y Zacatecas.

El estado de Querétaro cuenta con aproximadamente 500 hectáreas (Contreras et al., 2020) en los diversos viñedos que tiene de la zona, como: Viñedos Los Rosales, Vinícola Tequisquiapan, Cavas Freixenet, La Redonda, Vinícola Dorantes Cervera. Específicamente en los municipios de San Juan del Río, Tequisquiapan, Ezequiel Montes, El Marqués, Huimilpan y Colón, se encuentran los cultivares principalmente de las variedades, Cabernet-Sauvignon, Malbec, Merlot, Tempranillo, Chardonnay, Chening Blanc y Sauvignon Blanc.

En este sentido para las variedades más populares de uvas tintas se establecen ciertos parámetros de temperaturas en los que el estrés térmico puede causar que las uvas produzcan menos antocianinas, que es el pigmento que le da al vino tinto su color. Esta disminución de la concentración de antocianinas es más pronunciada en Malbec y Pinot Noir que en Merlot. Se encontró que las uvas produjeron más antocianinas acetiladas cuando se expusieron al estrés térmico (De Rosas et al., 2022).

En actualidad la investigación en México en los temas de viticultura y enología son la identificación de problemas como el establecimiento y plantación de viñedos, factores y componentes del clima que contribuyen a la maduración de la uva, el cambio de climático e incluso tomar en cuenta que cada vid provee características únicas al vino que se elabora, es un reto que se marca puntualmente en un estudio sobre la investigación científica y tecnológica de la viticultura (De Haro et al., 2023).

Un ejemplo de cómo el desarrollo tecnológico es aplicado a la producción agricultura en diferentes procesos es el sistema basado en el Internet de las Cosas (IOT) para la irrigación precia (García et al., 2020), en el cual se destacan cinco propuestas que utilizan el pronóstico del tiempo como única información de base en la aplicación general del sistema. Por ende, el monitoreo de la temperatura es uno de los parámetros más comunes en el monitoreo de los sistemas de riego IOT, los

ISSN: 2992-8338

sensores de temperatura más utilizados son el DHT11, el DHT22 y el LM35, estos sensores son de bajo costo. Estos proporcionan lecturas tanto de temperatura como de humedad relativa, lo que puede ser relevante para su amplio uso.

El principio de la eficacia en el uso de tecnologías de bajo coste y se puede describir también en el Sistema desarrollado por en 2022 (Chanchí-Golondrino et al., 2022), donde por medio de la placa libre ESP32 se hace uso de ventajas como La comunicación inalámbrica Wi-Fi y la posibilidad de implementar un mini servidor web para servir los datos de las variables de interés de los cultivos mediante mensajes y la incorporación de sensores de temperatura, de humedad como el DHT-11 que así como se menciona en "Tecnologías aplicadas al sector agrícola"(González et al., 2022), es de bajo coste y tiene la posibilidad de detectar temperatura de 0 a 50° y los porcentajes de humedad de 20 a 95%.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo de la vid es una actividad agrícola importante en muchas regiones del mundo. La vid es una planta susceptible a una gran variedad de factores ambientales y biológicos, que pueden afectar negativamente su rendimiento y calidad, generando posibilidades de enfermedades como el hongo Botrytis cinerea, uno de los más comunes según un estudio realizado (Y. S. Juárez, 2017).

Además de las enfermedades producidas de forma natural en las uvas, por exposición al sol o crecimiento en la sombra, como la ya mencionada, los cultivos de vid tienden a presentar plagas que pueden causar importantes pérdidas económicas para los viñedos. Según un estudio publicado en la revista Cop Protection en 2020 (Steiro et al., 2020), las plagas pueden causar pérdidas de hasta el 50% de la producción de uva en algunas regiones.

Para controlar las plagas en cultivos de vid, se utilizan una variedad de métodos como los redactados en "Sustainable management of the vine mealybug in organic vineyards" (Cocco et al., 2021), que incluyen:

Manejo integrado de plagas: este método combina diferentes métodos de control, como el uso de pesticidas, la rotación de cultivos y la introducción de enemigos naturales.

Pesticidas: los pesticidas son el método de control más común de las plagas en cultivos de vid. Sin embargo, el uso de pesticidas puede tener un impacto negativo en el medio ambiente.

Manejo cultural: el manejo cultural incluye prácticas que pueden ayudar a prevenir la propagación de plagas, como la limpieza del viñedo y la poda adecuada.

Pero no se menciona la detección en tiempo real de algún ser ajeno al cultivo.

El monitoreo y control de los cultivos de vid es esencial para garantizar una producción sostenible y de calidad. Sin embargo, el monitoreo y control tradicional de los cultivos de vid es un proceso laborioso y costoso, que requiere la intervención humana constante.

Otro ejemplo del uso de las tecnologías, a un nivel aún más actual, se redacta en el informe de tesis (Koen, 2023) sobre el uso de imágenes térmicas y multiespectrales para estudiar la temperatura de las vides y su relación con el estrés hídrico, la calidad de las uvas y las enfermedades.

La tecnología IOT ofrece una solución prometedora para el monitoreo y control de los cultivos de vid. Permite recopilar datos sobre las condiciones ambientales y biológicas de los cultivos de forma automática y en tiempo real. Estos datos pueden utilizarse para identificar problemas en el espacio de cultivo y tomar medidas correctivas de forma oportuna. Puede ser utilizado para detectar la presencia de la filoxera, una plaga que puede destruir los viñedos. Si se detecta la filoxera, el sistema puede automatizar la aplicación de pesticidas para controlar la plaga.

Esta tecnología puede ser utilizada para controlar el riego de los viñedos con un sistema que recopile datos sobre las condiciones climáticas y así determinar la cantidad de agua que necesita cada viñedo. Esto puede ayudar a ahorrar agua y reducir el impacto ambiental. Un sistema de monitoreo IOT también puede ser utilizado para optimizar la cosecha. El sistema puede recopilar datos sobre el estado de maduración de las uvas para determinar el momento óptimo para la cosecha. Esto puede ayudar a mejorar la calidad de la uva y el rendimiento de la cosecha para optimizar los tiempos y calidad para la temporada de enoturismo.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Una solución a los desafíos presentados en la sección anterior es la implementación de un sistema de monitoreo y control basado en IOT. Este sistema utiliza sensores para recopilar datos sobre las condiciones del viñedo, como temperatura, humedad, gases y presencia de plagas. Los datos recopilados se analizan en tiempo real para identificar situaciones anómalas. Si se detecta una situación anómala, el sistema puede tomar acciones preventivas o correctivas de manera automatizada o bajo la supervisión de un experto.

4.1 Componentes del sistema

El sistema consta de los siguientes componentes: microcontroladores, sensores y actuadores, base de datos y servidor central.

Microcontroladores: Los microcontroladores son dispositivos electrónicos que recopilan los datos de los sensores y los transmiten a un servidor central. Son 3 placas ESP32, dos de ellas cuentan con cámara, para la captura de imágenes.

Servidor central: Los datos de los sensores se recopilan a intervalos regulares y se envían al microcontrolador ESP32, almacena y analiza los datos de los dos microcontroladores con Cámara.

Base de datos: El servidor central también es utilizado para generar informes y tendencias, así como almacenar la información en una base de datos para su posterior análisis de historial.

ISSN: 2992-8338

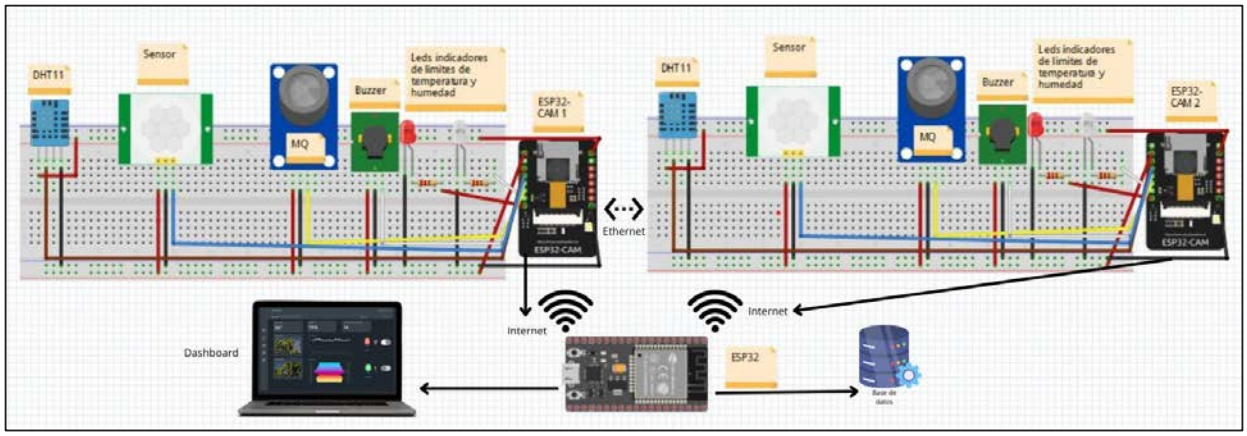


Figura 1. Componentes del sistema

Sensores: Los sensores son dispositivos que recopilan datos sobre las condiciones del viñedo. Los sensores utilizados en el sistema de monitoreo IOT para viñedos pueden medir una variedad de parámetros, como la temperatura, la humedad, presencia de gases nocivos y plagas.

Como se puede apreciar en la propuesta de la figura 2, para una sola ESP32-CAM, se utilizan sensores DHT11 para monitorear la temperatura y humedad del aire, módulos detectores de movimiento HC-SR501, sensores MQ-9 para para detectar la presencia de gases nocivos, como el monóxido de carbono, gas LP, y metano.

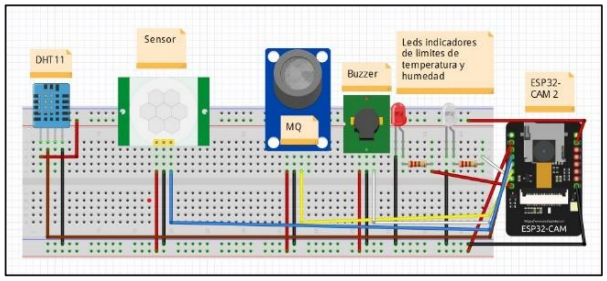


Figura 2. Propuesta de Circuito para una sola ESP32-CAM

Actuadores: En la figura 3 se presentan las decisiones de los actuadores. Se incorporan actuadores como LEDs, buzzers y botones ejecutar las actuaciones y funcionalidad del sistema.

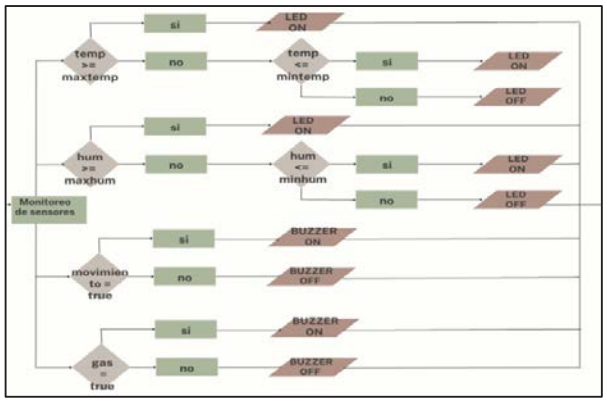


Figura 3. Diagrama de flujo actuadores

Los buzzers se utilizan para emitir alarmas audibles en el sistema. Al detectar una condición crítica en el cultivo, como una temperatura excesivamente alta, el buzzer suena para ahuyentar la plaga "amenaza" instantáneamente También se programan distintos patrones de sonido para indicar diferentes tipos de alertas.

También se usan botones para silenciar alarmas o cambiar la configuración del sistema. Los botones proporcionan una forma práctica de intervención manual en situaciones específicas. Y por su parte los LEDs proporcionan indicaciones visuales en el sistema de monitoreo y control.

Dashboard: El dashboard que se muestra en la figura 4 es una interfaz gráfica que permite a los agricultores visualizar los datos del sistema. El dashboard da la oportunidad de realizar un seguimiento del estado del viñedo al obtener la información desde la base de datos mediante el protocolo de suscripción MQTT y tomar decisiones informadas o de manera automática como la activación de alarmas.

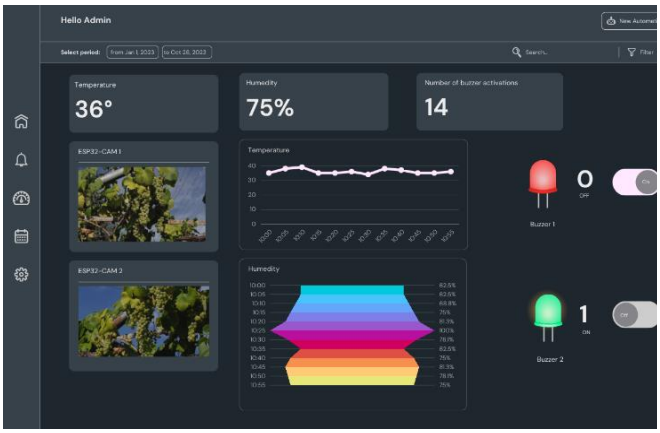


Figura 4. Dashboard

ISSN: 2992-8338

La interfaz se programa mediante el uso de una herramienta de programación visual que facilita los servicios y uso de protocolos como el mencionado como lo es Node-RED. La interacción del protocolo MQTT desde el inicio de la toma de datos hasta la presentación al usuario final se muestra en la figura 4, a su vez se ejemplifica la manera en la que para cada elemento que es monitoreado se establecen topics específicos en los que se publica y se consulta la información.

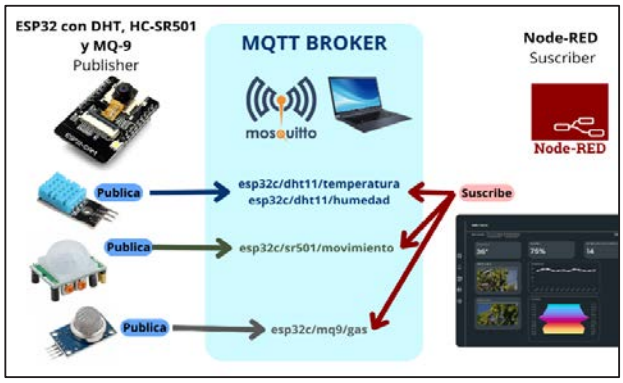


Figura 4. Comunicación mediante MQTT

4.2 Beneficios de la propuesta

Monitoreo en tiempo real: El sistema proporciona un monitoreo constante y en tiempo real de las condiciones del viñedo. Esto permite a los agricultores tomar medidas rápidas para abordar los problemas potenciales.

Actuaciones instantáneas: El sistema puede tomar acciones preventivas o correctivas de manera automatizada. Esto permite a los agricultores responder a los problemas de manera rápida y efectiva.

Almacenamiento de información en tiempo real: Los datos recopilados por el sistema se almacenan en tiempo real. Esto permite a los agricultores realizar un seguimiento del estado del viñedo en cualquier momento y realizar también un análisis del historial en un futuro.

Ahorro de recursos: Al automatizar el monitoreo y las acciones, se pueden ahorrar recursos, como agua y pesticidas. El sistema puede, por ejemplo, activar el riego solo cuando sea necesario o liberar pesticidas solo en caso de infección.

Mejora de la calidad de la uva: El monitoreo preciso de factores como la temperatura puede contribuir a una mayor calidad de la uva. La uva cultivada en condiciones óptimas logra ser la adecuada para cada variedad de vino.

Reducción del impacto ambiental: Al utilizar datos para tomar decisiones más informadas, se puede reducir el impacto ambiental al minimizar el uso de pesticidas y recursos.

5. RESULTADOS

Considerando que la propuesta de sistema ofrece la serie de beneficios ya mencionados los cuales pueden ayudar a los viticultores a mejorar la productividad, reducir los costos y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones. Algunos de los resultados que se pueden obtener son los siguientes:

Identificar problemas en el espacio de cultivo de manera temprana, lo que permite tomar medidas correctivas y evitar pérdidas de producción. Hecho que puede ayudar a evitar que las uvas se quemen y pierdan su calidad.

El sistema automatiza acciones en el control de los cultivos, lo que reduce la necesidad de mano de obra.

Permite utilizar recursos de forma más eficiente, lo que reduce el impacto ambiental de la producción de vino. Por ejemplo, el sistema puede ayudar a los viticultores a optimizar el uso de fertilizantes y pesticidas en un momento determinado, lo que puede ayudar a reducir la contaminación del suelo y del agua.

Puede ayudar a los viticultores a garantizar que las uvas se cultiven en condiciones óptimas, lo que contribuye a mejorar su calidad y sabor.

Promueve un espacio para que los viticultores logren identificar y tomar medidas correctivas ante problemas que puedan causar pérdidas de cosecha, como plagas, enfermedades o condiciones climáticas adversas.

6. CONCLUSIONES

El sistema propuesto es una solución efectiva para el monitoreo de cultivos de vid. El sistema es económico y fácil de implementar, y es capaz de monitorear las condiciones del cultivo de manera práctica e instantánea.

El sistema de monitoreo IOT soluciona lo siguiente:

Detectar la presencia de plagas en un viñedo. Si se detecta una plaga, el sistema puede automatizar la aplicación de pesticidas. Esto puede ayudar a prevenir la propagación de la plaga y proteger la cosecha.

Controlar el riego de un viñedo. El sistema puede recopilar datos sobre las condiciones climáticas y del suelo para determinar la cantidad de agua que necesita el viñedo. Esto puede ayudar a ahorrar agua y reducir el impacto ambiental.

La solución propuesta aprovecha la tecnología IOT para abordar los desafíos en la viticultura y mejorar la calidad y la eficiencia de la producción de uva. El monitoreo y control automatizado permitirán a los agricultores tomar decisiones basadas en datos precisos, lo que a su vez conducirá a un cultivo de vid más saludable y sostenible.

REFERENCIAS

Chanchí-Golondrino, G.-E., Ospina-Alarcón, M.-A., & Saba, M. (2022). Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista Científica*, *44*(2), 257–271. https://doi.org/10.14483/23448350.18470

Cocco, A., Pacheco da Silva, V. C., Benelli, G., Botton, M., Lucchi, A., & Lentini, A. (2021). Sustainable management of the vine mealybug in organic vineyards. In *Journal of Pest Science* (Vol. 94, Issue 2, pp. 153–185). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s10340-020-01305-8

ISSN: 2992-8338

Contreras, D., Thomé-Ortiz, H., & Xavier Medina, F. (2020). *Enoturismo y promoción del territorio. Análisis comparativo entre el nuevo y el viejo mundo del vino*.

De Haro, J., Porras, D. A., Villegas, A., & Meraz, M. (2023). Análisis de la producción científica e investigación en Viticultura y Enología de México. In *CIENCIA ergo-sum* (Vol. 31, Issue 3). http://orcid.org/0000-0001-5333-7457

De Rosas, I., Deis, L., Baldo, Y., Cavagnaro, J. B., & Cavagnaro, P. F. (2022). High Temperature Alters Anthocyanin Concentration and Composition in Grape Berries of Malbec, Merlot, and Pinot Noir in a Cultivar-Dependent Manner. *Plants*, *11*(7). https://doi.org/10.3390/plants11070926

García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Issue 4). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/s20041042

González, C., Gibeaux, S., Pittí, J., & Gomez, D. (2022). *Tecnologías aplicadas al sector agrícola*. https://iotpanama.net/

Juárez, Y. S. (2017). *Detección de Botrytis cinerea mediante PCR en cultivos de vid y evaluación del biocontrol con Bacillus subtilis Q11*.

Koen, E. (2023). *Canopy temperature distribution in vineyards by analysing UAV 3D point clouds fused with thermal information*.

Steiro, Å. L., Kvakkestad, V., Breland, T. A., & Vatn, A. (2020). Integrated Pest Management adoption by grain farmers in Norway: A novel index method. *Crop Protection*, *135*. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105201

Vázquez, A., Bustamante, S. P., Márquez, T., & Andrea, M. (2022). *Industria vitivinícola mexicana en el siglo XXI: Retos económicos, ambientales y sociales.* https://www.researchgate.net/publication/362906908

ISSN: 2992-8338

Data science application for Tilapia (Oreochromis niloticus) production prediction

Astrid Ariadna Torres Fernández*, Miguel Ángel Couoh Novelo*, Sandra Magali García García*, Areli Flores Morales*, Verónica Reyes García*

** Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala,Tlax.90122 México (e-mail:astrid.tf@altiplano.tecnm.mx, miguelcouoh@gmail.com, sandra.tecinfo@gmail.com, areli.fm@altiplano.tecnm.mx, veronica.rg@altiplano.tecnm.mx)*

Summary: This project begins with automation through embedded systems for production processes based on the needs that are identified as priorities in aquaculture producers with production units under controlled environments in greenhouses and vats, in this regard the economic growth, of them in the State of Tlaxcala has benefited in many aspects. This is in order to accelerate their line of learning regarding the tilapila production through prediction to make certain decisions in a timely manner, to promote the growth of these living organisms. The variables analyzed were temperature [T], dissolved oxygen [DO], and quantity of food [CA]. Finally, through the application of data science, it was possible to predict the optimal values for the tilapia growth based on several variables that can change over the course of 24 hours. Some benefits were obtained such as economic utility reflected in the decrease in light payment. and the increase in the tilapia weight the prior to its sale.

Keywords: Data science, predictive model, embedded systems, dissolved oxygen.

1. INTRODUCTION

La globalización económica ha implicado una convergencia de modelos socio económicos en todo el mundo, en el estado de Tlaxcala la actividad acuícola se ha beneficiado a través de programas de gobierno, de tal forma que productores acuícolas dedicados a la producción de tilapia en ambientes controlados le han apostado a la sistematización tecnología en sus unidades de producción. Con esto su actividad comercial se ha beneficiado significativamente en los últimos años la producción de tilapia controlada con tecnología ha experimentado avances significativos en la acuicultura moderna. La implementación de tecnologías avanzadas ha permitido mejorar la eficiencia, la productividad y el monitoreo en los sistemas de cultivo de tilapia.

La acuacultura se ha convertido en una actividad de rápido crecimiento en México, en parte por el crecimiento de la población mundial y por el cambio de hábitos alimenticios al considerar las carnes blancas como las más sanas y nutritivas, del mismo modo tiene un valor adquisitivo accesible a comparación de otras El presente proyecto se presenta de inicio con la automatización a través de sistemas embebidos para procesos productivos basados en las necesidades que se identifican como prioritarias de los productores acuícolas con unidades de producción en ambientes controlados en invernadero y tinas, en este sentido el crecimiento económico de ellos en el Estado de Tlaxcala se ha visto beneficiado en diversos aspectos. Esto con la finalidad de acelerar su línea de aprendizaje respecto a la producción de tilapila mediante la predicción para la toma de decisiones certeras en tiempo y forma, para favorecer el crecimiento de estos organismos vivos. Las variables analizadas fueron temperatura [T], oxígeno disuelto [OD] y cantidad de alimento[CA]. Se logro finalmente a través de la aplicación de ciencias de datos predecir los valores óptimos para el crecimiento de la tilapia en base a diversas variables que pueden cambiar en el trascurso de 24 horas, se obtuvo algunos beneficios como utilidad económica reflejada en la disminución del pago de luz y el aumento del peso de la tilapia previo a su venta.

La producción de carnes blancas en México se ha incrementado, se practica esta actividad en 23 de 32 estados siendo de los mayores productores Morelos, Nayarit, Jalisco, Veracruz y Yucatán, el estado de Tlaxcala esta actividad primaria está creciendo significativamente.

En el municipio de Atlihuetzia se identifica a una de las unidades de producción más grande en el Estado de Tlaxcala, donde se tiene la problemática de controlar las variables de oxígeno disuelto en el agua, el ph y temperatura entre otras variables para determinar los valores óptimos para el

ISSN: 2992-8338

crecimiento de la tilapia mejorando las condiciones de venta en el producto en el mercado.

La ciencia de datos para la predicción en el control y monitoreo de variables para determinar el oxígeno disuelto en el agua en la producción de tilapia favorece esta actividad en la toma de decisiones de manera oportuna.

2. PROBLEMATICA

La soberanía alimentaria en el estado de Tlaxcala ha marcado tendencias de crecimiento en el sector acuícola, así como lo refiere la Secretaria de Impulso Agropecuario [11] por lo que ha impulsado el crecimiento en esta área a los productores acuícolas, esto no solamente aumenta la necesidad de una infraestructura mayor para respaldar la inocuidad del producto, sino de la capacitación a lo largo de toda la cadena productiva ya que muchas de estas regulaciones no son obligatorias para los productos nacionales dando como resultado diferencias notables entre la calidad de los productos [10]. Las exigencias en temas de inocuidad para las exportaciones han aumentado en los últimos años, algunos problemas en inocuidad de los alimentos pueden originarse en la producción primaria, transfiriéndose a otras fases, como el procesamiento, empaque, transporte, entre otros. Esto resalta la importancia de tener un control sobre la inocuidad del proceso de producción en la unidad de producción "La Escondida".

Es importante puntualizar que la falta de sistematización en las unidades de producción complica el manejo adecuado para la medición de la temperatura, ph, oxígeno disuelto, el amonio que es una sustancia tóxica y la más peligrosas en el cultivo acuático. Se produce continuamente excretadas como residuo del metabolismo de las tilapias, la eliminación de estas substancias nitrogenadas es de vital importancia para el éxito de la producción acuícola. El control y administración de las variables anteriores requieren de un manejo adecuado para brindar las mejores condiciones de vida y crecimiento en la tilapia, por lo que en el presente trabajo se busca crear una herramienta de manejo y control para llevar a cabo en los mejores términos la producción, el modelo relaciona algunas de las variables influyentes en el proceso de producción como la temperatura, cantidad de alimento que se proporciona al pez (relacionado directamente con el apetito del pez) y oxígeno disuelto.

A continuación se muestra una tabla resumen de las variables de temperatura, ph, fotosíntesis, oxígeno disuelto en el agua, edad, alcalinidad, sobrealimentación en la tilapia y amonio, que deberán tenerse para la producción de tilapia y las relaciones obtenidas de diferentes fuentes obtenidas. No tener el control y monitoreo de las variables mencionadas representan un posible riesgo en la producción de tilapia y comprometen la rentabilidad de la venta de este producto si no se da en las condiciones óptimas.

TEMPERATURA	*Disminuye* la temperatura (<16°C) → *Disminuye* la conversión alimenticia → *Disminuye* crecimiento.
	Disminuye la temperatura → *Disminuye* el metabolismo y los procesos fisiológicos.
	Disminuye la temperatura (< 20 °C) → *Disminuye* reproducción.
	Disminuye la temperatura → *Aumenta* estrés → *Aumenta* enfermedades → *Aumenta* mortalidad.
	Disminuye la temperatura (< 11 °C) → *Aumenta* mortalidad.
	Aumenta la temperatura → *Aumenta* la cantidad de amonio no ionizado (tóxico).
	Aumenta la temperatura (> 37-38°C) → *Aumenta* estrés.
	Aumenta la temperatura → Disminuye concentración de oxígeno disuelto.
PH	*Disminuye* pH (< 4.5) → *Aumenta* mortalidad.
	4.5 < pH < 6.5 → *Disminuye* reproducción.
	pH < 6.5 → *Disminuye crecimiento.*
	6.5 < pH < 8.5 → valores de pH óptimos.
	8.5 < pH → *Disminuye* Crecimiento.
	8.5 < pH → *Aumento* de amonio no ionizado (tóxico).
	8.5 < pH → *Aumento* fitoplancton.
	8.5 < pH < 11 → *Disminuye* reproducción.
	11 < pH < 14 → *Aumenta mortalidad.*
FITOPLANCTON / FOTOSINTESIS	*Aumenta* fitoplancton → *Aumenta* fotosíntesis (en el día) → *Aumenta* concentración de oxígeno disuelto → *Aumenta* pH.
	Aumenta fotosíntesis → *Disminuye* cantidad de amonio no ionizado (tóxico).
	No hay fotosíntesis (en la noche)→ *Disminuye* concentración de oxígeno disuelto.
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO	*Disminuye* concentración de oxígeno disuelto (< 0.08 mg/L) → *Aumenta* cantidad de amonio no ionizado (tóxico) → *Aumenta* mortalidad.
	Disminuye concentración de oxígeno disuelto (< 5 mg/L) → *Aumenta* estrés.
	Aumenta concentración de oxígeno disuelto → *Disminuye* materia orgánica por procesos de mineralización (oxidación).
	Aumenta concentración de oxígeno disuelto (> 8 mg/L) → *Aumenta* estrés.
EDAD	*A menor* edad del pez → *Aumenta* requerimientos de oxígeno.
ALCALINIDAD	*Disminuye* alcalinidad → *Aumenta* sensibilidad a variaciones de pH .
SOBREALIMENTACION	*Sobre Alimentación* →*Aumenta* materia orgánica → *Disminuye* concentración de oxígeno disuelto.
AMONIO NO IONIZADO (TÓXICO)	*Aumenta* amonio no ionizado (tóxico) → *Disminuye* conversión alimenticia.
	Aumenta amonio no ionizado(tóxico) → *Disminuye* crecimiento.
	Aumenta amonio no ionizado (tóxico) → *Aumenta* estrés → *Aumentan* cantidad de enfermedades

Tabla 1. Variables de estudio en la producción de tilapia

3 MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la unidad de producción de "LA ESCONDIDA" ubicada en el municipio de Atlihuetzia Tlaxcala, a cargo de Luis Adán Báez Sánchez, como se muestra en la Imagen 1, el ensayo se inició implementando un sistema embebido para controlar los niveles de oxígeno disuelto en el agua principalmente, para monitorear algunas variables a través de sus diferentes sensores, para posteriormente programar los rangos de valores idóneos para la producción de tilapia y las condiciones climatológicas en el estado de Tlaxcala.

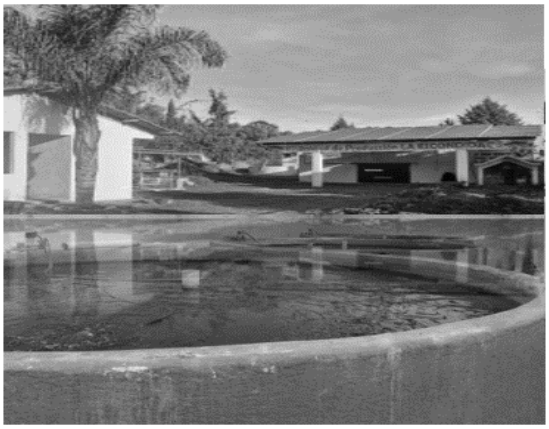


Imagen 1. Unidad de producción acuícola "LA ESCONDIDA "

ISSN: 2992-8338

Es este estudio se utiliza SAS (Sistema de análisis estadístico) a través de sus procedimientos estadísticos descriptivos (UNIVARIATE), que a través de él se detectan las observaciones más extremas y (SEVERITY), la cual determina la distribución muestral y se ajusta cada una de las variables evaluadas. En el ensayo se sembraron 45,000 peces en tres tinas con un peso promedio de 72 gr, con una dimensión de 10 m de diámetro con una profundidad de seis metros, cada tina tiene una capacidad de 1050 m^3 aproximadamente, la formulación del modelo se divide en el estudio de la temperatura, el oxígeno disuelto y la cantidad de alimentación, para poder evaluar el peso y talla de la tilapia al final de la producción, que dura aproximadamente entre 6 a 9 meses aproximadamente.

Por otro lado se estableció un tiempo de tres meses de estudio para la recolección de los datos reportados por los sensores instalados y monitoreados por el sistema embebido, los datos obtenidos en primer lugar fueron los de la temperatura, seguido de la cantidad de alimento y por último el oxígeno diluido en el agua, se tomó una población muestra de 40 organismos vivos para cada etapa (E1,E2,E3,E4,E5,E6), correspondiendo a 15 días para cada una.

3.1 Temperatura

Como se puede observar en la Figura 1 se relacionan diversos valores que contribuyen al crecimiento oportuno en base al peso promedio de las tilapias, el modelado de datos se obtuvo aplicando la siguiente Ecuación 1.

$$\textit{Peso promedio de peces} = \frac{\Sigma \text{ peso de peses (g)}}{\Sigma \text{ Nº peces}} - \left[\frac{\Sigma \text{ peso de peces (g)}}{\Sigma \text{ Nº peces}} \times 0.03\right] \quad \text{Ec. 1}$$

Es importante destacar que los resultados obtenidos de la ecuación anterior representan el crecimiento y el peso acumulado en la tilapia muestra.

	Temperatura (T)	Peso crecimiento (gr)	Peso acumulado (gr)	Poblacion muestra	Tiempo cada 15 días	tiempo
Válido	6	6	6	6	6	6
Ausente	0	0	0	0	0	0
Media	11.333	193.696	278.682	40.000		
Desviación Típica	9.564	150.327	222.580	0.000		
Mínimo	0.000	1.746	73.740	40.000		
Máximo	25.000	369.000	598.000	40.000		

Nota. No están disponibles todos los valores para las variables *Nominal Text*

Tabla 2. Estadística Descriptiva

La ganancia de peso acumulado en la tilapia a diferentes temperaturas se calculó en base a la composición de la tabla 1, utilizando la Ecuación 1.

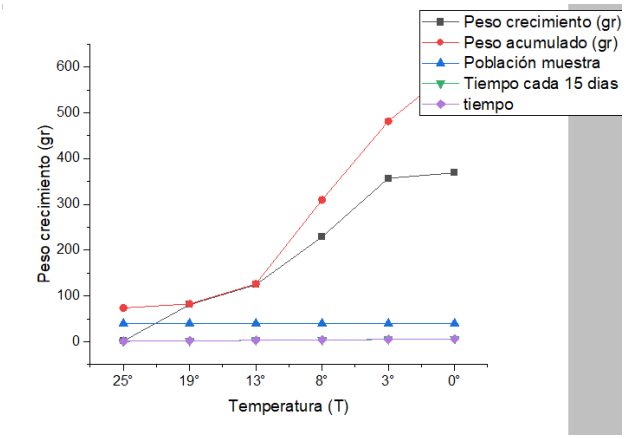


Figura 1. Peso acumulado y talla de la tilapia con diversas temperaturas

3.2 Cantidad alimenticia

Los costos en alimentación durante la producción de tilapia representan el 50–60 % de los costos totales (Nicovita 2012). Debido a los altos costos en alimentación, es fundamental una evaluación continua de las estrategias de alimentación En este trabajo se alimentó de manera balanceada considerando marcas comerciales como (Aqua Feed) cuya formulación nutrimental y composiciones se muestra en la Tabla 2.

Repetición	Peso de peces (kg)	Nº peces	Peso promedio
1	11.7	12	946
2	12.4	13	925
3	11.8	12	954
Σ	35.9	37	
$\bar{X}$			942

Table 3. Estadísticos Descriptivos

El esquema de alimentación constó en pesas de 10-40 peses por tina, durante 120 días, las tilapias en promedio tuvieron un peso entre 900-1050 gr, en su sexto mes de gestación, para hacer el cálculo de la cantidad alimenticia de esta población muestra se utilizó la Ecuación 2.

Por otro lado, las variables de temperatura y oxígeno disuelto se controlaron dentro de los parámetros sugeridos, en el caso de la temperatura lo estimado es entre los 24–32 °C y en el caso del oxígeno se estimó en 5 g/L, encendiendo el sistema de aireación de manera manual cuando fue inferior a los 3 g/L, por otro lado el PH se mantuvo entre 6.5 y 9.

ISSN: 2992-8338

$$Conversion\ alimentaria = \frac{Alimento\ Acumulado\ por\ tina\ (kg)}{\text{Biomosa por tina (kg)}}$$

Ec. 2

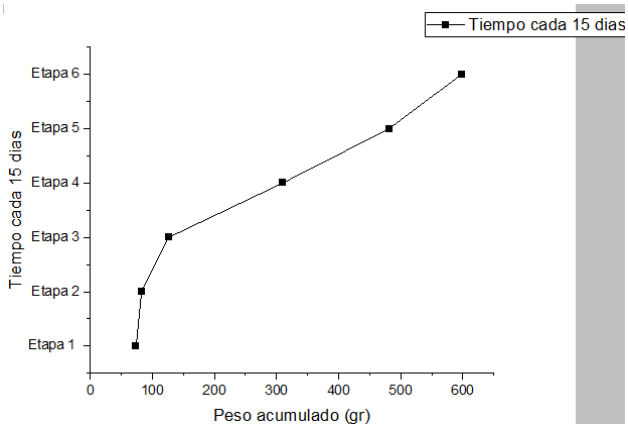


Figura 2. Cantidad Alimenticia en diferentes etapas

3.3 Oxígeno disuelto

El consumo de oxígeno es de vital importancia en la producción de tilapia y sirve como indicador del metabolismo en estos organismos permite determinar el flujo del agua o la aireación requerida para mantener los niveles de oxígeno disuelto que demandan estas especies. Los niveles óptimos de oxígeno varían según el tamaño y la edad de la tilapia como se muestra en la Figura 3.

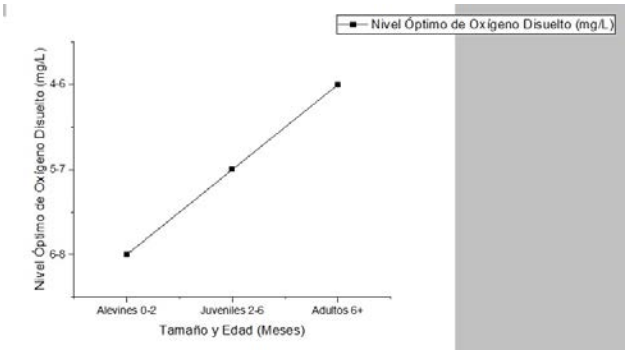


Figura 3. Niveles de concentración de oxígeno según la edad

Los factores que contribuyen a la disminución de oxígeno disuelto en el agua son la descomposición de la materia orgánica, el alimento no consumido, aumento de la taza metabólica (variación de la temperatura del día con respecto a la noche), los organismos vivos microscópicos, entre otros.

Al mantener los niveles óptimos de oxígeno disuelto en el agua se contribuye a tener mayor tasa de crecimiento, se mejora la cantidad alimenticia, se reduce la tasa de mortalidad, se reducen las enfermedades por su concentración de oxígeno adecuada, calidad en el mercado y mejor rentabilidad en la producción.

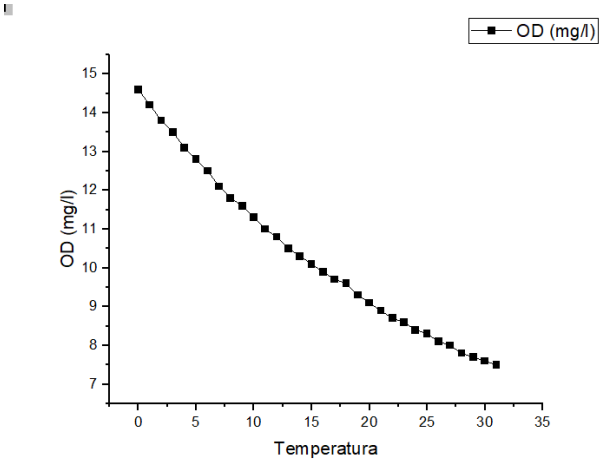
Para estudiar la predicción de la producción de tilapia uno de los principales factores analizados es el oxígeno disuelto en el agua junto con las variables mencionadas anteriormente, se utilizó un sensor de oxígeno disuelto de vernier para comparar los datos con el kit de Gravity™ Analog Dissolved Oxygen, instalado a través de sistema embebido, de esa manera se obtuvo dos rangos de oxígeno en cada tina. Se realizo la toma cada tres horas durante 3 meses, se concentraron los valores constantes de temperatura y de oxígeno como se muestra en la tabla 4.

Temperatura (°C)	OD (mg/l)	Temperatura (°C)	OD (mg/l)
0	14.6	16	9.9
1	14.2	17	9.7
2	13.8	18	9.6
3	13.5	19	9.3
4	13.1	20	9.1
5	12.8	21	8.9
6	12.5	22	8.7
7	12.1	23	8.6
8	11.8	24	8.4
9	11.6	25	8.3
10	11.3	26	8.1
11	11.0	27	8.0
12	10.8	28	7.8
13	10.5	29	7.7
14	10.3	30	7.6
15	10.1	31	7.5

Table 4. Valores de medición de Oxígeno Disuelto

La medición que proyecta la figura 4 en los niveles de oxígeno disuelto en el agua son más altos cuando las temperaturas son bajas, lo que demanda la atención del productor todo el día durante los siete días de la semana, también los recursos energéticos son consumidos durante este periodo de tiempo dejando el aireador encendido durante toda la noche. Por otro lado, en la misma figura se valora que entre mayor temperatura es menor el consumo de oxígeno disuelto en el agua.

ISSN: 2992-8338



Fígura4. Niveles de concentración de oxígeno según la temperatura

El modelo predictivo de este proyecto considera los resultados obtenidos en este proyecto como base para que sea autónomo en la toma de decisiones en la variable de oxígeno disuelto para el encendido del aireador durante el día y la noche, el análisis de los resultados obtenidos se muestra a continuación.

4. RESULTADOS

La ciencia de datos aplicada en este estudio cumple la finalidad de tener información exacta en el comportamiento de temperatura, la cantidad alimentaria y el oxígeno disuelto en el agua, para desarrollar un modelo predictivo en función del comportamiento de oxígeno diluido principalmente y controlado a través del sistema embebido en la unidad de producción la Escondida, es un modelo único implementado en el Estado de Tlaxcala, que sirve como modelo prototipo y de estudio para los productores en esta Entidad, que se dedican a las actividades acuícolas bajo ambientes controlados, de igual forma brinda información oportuna en tiempo real que se recibe por vía mensaje de texto al C. Luis Adán Báez Sánchez a su dispositivo móvil, la programación del sistema embebido hace posible que las tinas de la unidad de producción sean monitoreadas durante todo el año.

El análisis predictivo es un área de la minería de datos que consiste en la extracción de información existente en los datos y su utilización para predecir tendencias y patrones de comportamiento, pudiendo aplicarse sobre cualquier evento desconocido, ya sea en el pasado, presente o futuro. El modelo predictivo identifico los modelos de comportamiento de tres variables donde se obtuvieron los siguientes resultados que se observan en la Tabla 5.

Etapa	Temperatura °C	Oxígeno Disuelto mg/l	Cantidad alimentaria kg
1	29.45	5.0	1.000
2	29.06	5.0	0.789
3	29.38	5.0	0.989
4	29.57	5.0	0.890
5	29.21	5.0	0.985
6	29.06	5.0	0.894

Table 5. Valores ideales en T, OD y CA

Se puede observar que las temperaturas ideales para obtener mayor ganancia de peso en el la tilapia oscila entre los 29° y 31°C, puntualizando que la unidad de producción "La Escondida", tiene una infraestructura compuesta por naves tipo invernadero, lo que favorece la conservación de temperatura e incluso durante el día superan esta referencia. Los valores de oxígeno disuelto también hacen parte del rango más deseable en el cual se obtiene mayor crecimiento por día, lo que implica que el peso ganado y el crecimiento obtenido se ve reflejado en una cantidad alimentaria disminuida y balanceada, con el objetivo de reducir los gastos, debido a la ganancia de peso por temperatura y concentración de oxígeno reflejado en disminución de costos.

Con respecto a los resultados del peso con lo que respecta a la cantidad alimenticia se obtuvo diversidad en la ganancia de peso en las etapas evaluadas como se muestra en la Tabla 6 de este estudio.

ETAPAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	ETAPA 5	ETAPA 6
1	1.23	2.4	4.9	14.6	7.45	4.94
2	4.56	8.7	16.7	16.9	34.5	13.45
3	6.78	12.7	24.2	37.9	46.7	34.56
4	7.89	14.8	28.9	45.7	52.4	46.89
5	7.23	13.2	30.2	49.6	63.4	52.32
6	7.59	11.7	34.3	51.4	70.3	60.34

Table 6. Valores de ganancia de peso, por rango de oxígeno

Se valora la estrecha relación entre el peso ganado por alimentación con la ganancia de peso por etapa, siendo la Etapa 1 la que menos peso de referencia tiene en promedio llegando a los 5.88gr por pez. La etapa que mejor ganancia de peso tiene es la Etapa 5 llegando a los 45.79 grs.

La programación del modelo predictivo para la producción de tilapia está sustentada en el presente estudio el cual a través de la programación con Arduino UNO y los diversos sensores que integran el sistema embebido, cumplen con la automatización de la unidad de producción en función de la información obtenida durante este estudio, lo que favorece el tiempo y los costos de la producción.

ISSN: 2992-8338

Para poder determinar la inversión por lote de producción de tilapia, es necesario conocer el costo de venta de la producción y la inversión final de la producción, considerando insumos, mano de otra y pago de servicios.

|5. DISCUSION

Como parte de la investigación de los modelos predictivos, se presenta las principales técnicas para crear modelos predictivos:

Definición del Problema: Consta de comprender claramente el problema que estás tratando de resolver, y definir las variables de entrada (características) y la variable de salida (objetivo o variable a predecir).

Recopilación y Exploración de Datos: Aquí se recopilar datos relevantes para el problema, para realizar un análisis exploratorio de datos para comprender la distribución, la presencia de valores atípicos y la correlación entre variables.

Preprocesamiento de Datos: Manejar valores faltantes y valores atípicos. Codificar variables categóricas si es necesario. Normalizar o estandarizar variables numéricas.

División de Datos: Se trabaja en dividir el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba para evaluar el rendimiento del modelo y posteriormente hacer la selección de características, que consta de seleccionar las características más relevantes para el modelo. Se puede utilizar técnicas como la importancia de características o métodos de selección de características.

Elección del Modelo:Seleccionar un modelo predictivo adecuado según la naturaleza del problema (regresión, clasificación, etc.). Se puedes probar varios algoritmos y comparar su rendimiento. Es fundamental hacer el entrenamiento del Modelo donde se utilizar el conjunto de entrenamiento para ajustar los parámetros del modelo.
Utilizar técnicas como la validación cruzada para evaluar el rendimiento del modelo de manera robusta. De esta manera se llega a la evaluación del Modelo, que consiste en evaluar el rendimiento del modelo utilizando el conjunto de validación y, finalmente, el conjunto de prueba y se debe utilizar las métricas adecuadas según el tipo de problema (precisión, recall, MSE, etc.).

Interpretación del Modelo, que cosiste en comprender la interpretación del modelo y cómo toma decisiones y utilizar herramientas como gráficos de importancia de características para implementar el modelo en un entorno de producción si demuestra ser efectivo. Finalmente asegurarse de que el modelo siga siendo relevante y preciso con el tiempo, se puede ajustar y mejorar tu modelo basándote en los resultados y las observaciones durante todo el proceso.

5. TRABAJO A FUTURO

Las áreas de oportunidad para este proyecto se concretan en establecer esquemas de predicción para todos los meses del año, trabajar modelos predictivos para la producción de tilapia que sirvan como modelos de trabajo en base a los diferentes tipos de clima que se manejan en el Estado de Tlaxcala de acuerdo a la temporada del año. Este modelo dará al productor márgenes económicos, de tiempo y ganancias.

Esta propuesta de modelo predictivo es una primera aproximación que se puede analizar durante todo el año y se pueden extender las variables de estudio como ph, fotosíntesis, edad, materia orgánica, presión atmosférica, alcalinidad, salinidad, amonio entre otros. El sistema embebido utilizado puede ser reprogramado en función de las variables mencionadas, de igual manera se puede ampliar las funciones de difusión de la información que se tienen (mensaje de texto), se recomienda que la información de los sensores sea almacenada en la nube, de tal manera que se tengan los comportamientos históricos de las variables de estudio, en la unidad de producción " La Escondida", de este modo la información podrá ser consultada en todo momento por el encargado de la unidad. Para llevar a cabo este proceso se deberá de contar con internet en la unidad de producción y adaptar un módulo wifi al sistema embebido para poder ampliar la tecnología inmersa en el sistema embebido instalado.

6. CONCLUSIONES

La capacidad de almacenar y gestionar conjuntos de datos masivos ha crecido de manera exponencial en los últimos años, al igual que las necesidades cotidianas en diversos sectores empresariales, gubernamentales, sociales, etc. Por otro lado, la sistematización de procesos productivos se puede utilizar en cualquier parte, el manejo y procesamiento de la información depende de las necesidades a resolver, los resultados que se generan de la información sirven para la toma de decisiones en tiempo real en la mayoría de los casos dependiendo en área donde se aplique.

El desarrollo de este proyecto nos permite conocer en la practica el estudio de las variables que intervienen en la producción de tilapia, para poder desarrollar un modelo predictivo que sin duda este análisis, puede ser una opción para los productores de tilapia en el estado de Tlaxcala, que les facilite la toma de decisiones en su vida diaria de igual manera se concluye que la tecnología facilitan las actividades y se pueden aplicar en cualquier rama de estudio, el sector apícola no es la excepción, la combinación de diversas áreas de estudio como la estadística, el hardware y el software aplicadas a las necesidades de la acuicultura son el resultado de aplicaciones que se utilizan en las necesidades de la vida diaria.

ISSN: 2992-8338

Finalmente es necesario hacer énfasis que el modelo predictivo esta desarrollado en una primera aproximación, se consideraron las variables de mayor relevancia en la producción de tilapia, pero de acuerdo a la información presentada en la tabla 1, se pueden considerar diversas variables más lo que puede favorecer aún más los esquemas de trabajo para el productor de tilapia bajo condiciones controladas en el Estado de Tlaxcala

7. REFERENCIAS

Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, «Autoridad Nacional de Acuicultura y pesca,» 2011. [En línea]. Available: http://www.aunap.gov.co/index.php/aunap/funciones. [Último acceso: febrero 2019]

Calderer, Reig Anna (2021) Influencia de la temperatura y la salinidad sobre el crecimiento y consumo de oxigeno de la dorada. Universidad de Barcelona departamento de biología Animal, Bienni 1992-94 trabajo para optar el título de maestría en ciencias biológicas, revisado el 25 de febrero de 2017.

FAO. (1979) Basil, Organización para la Agricultura y Alimentacion "Programa para la formación de acuicultores en el centro regional latinoamericano de acuacultura".

H. R. Gómez, P. V. Daza y M. C. Avila, Fundamentos de Acuicultura Continental, Segunda ed., Bogotá, 2001.

Jobling M. 1982. A study of some factors affecting rates of oxygen consumption of plaice, Pleuronectes platessa L. J. Fish Biol. 20(5):501-516

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «Resumen El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura,» Roma, 2016.

Ministerio de Salud y Protección Social, «Minsalud,» [En línea]. Available: https://www.minsalud.gov.co/salud/Paginas/inocuida d-alimentos.aspx. [Último acceso: 27 marzo 2019].

M. García, «La República,» 12 Noviembre 2013. [En línea]. Available: https://www.larepublica.co/archivo/cultivo-detilapia-y-trucha-arco-iris-un-negocio-con-potencialexportador-2080386. [Último acceso: 26 marzo 2019].

M. García, «Cultivo de tilapia y trucha arco iris, un negocio con potencial exportador,» La República, 12 Noviembre 2013.

Nicovita. 2012. Manual de Crianza de Tilapia. Lima, Perú. [consultado 2019 ene 11]. Disponible en: http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual de crianza de tilapia.pdf.

Rubio Lozano, M. S. 2013. Detection of Listeria monocytogenes, Salmonella and Yersinia enterocolitica in beef at points of sale in Mexico. Rev. mex. de cienc. pecuarias (online), 4(1), 107-115. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007- 11242013000100009&lng=es&nrm=iso

Secretaría de Impulso Agropecuario, Secretaría de Impulso Agropecuario. [En línea] del Gobierno de Tlaxcala (siatlaxcala.gob.mx). [Último acceso: 10 febrer0 2023].

ISSN: 2992-8338

Financial Feasibility Study of a Home Fermenter Appliance Using the Canvas Model

Tlaloc González Sánchez*, Irvin David Velásquez Mora*, Reynaldo Angel Serrano Cruz*, María Fernanda De Jesús Ramírez*, Yen Ventura González*, Gloria Lilia Osorio Gordillo*, Carlos Manuel Astorga Zaragoza*

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*
E-mail: m22ce076@cenidet.tecnm.mx

Abstract: The development of a business model involves addressing a wide range of aspects to validate the profitability of a product or service. However, the use of the Canvas canvas offers a methodology that condenses these ideas into general concepts to achieve the same goal by focusing on identifying the company's approach and value proposition for the market. The combination of financial feasibility with the Canvas canvas aims to break down the nine blocks of the model with detailed financial analysis information. The methodology involves associating each block of the canvas with financial feasibility topics, thus achieving a detailed and segmented business model by blocks to understand the meaning of each section. To illustrate the utility of this technique in the development of initial projects, a financial feasibility study was conducted on a home fermenter. This practical case demonstrates the effectiveness of this combination in evaluating the feasibility of seed projects.

Keywords: Canvas, Financial feasibility, Fermenter, Appliance, Methodology, Financial analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Un modelo de negocios es una herramienta esencial para cualquier emprendedor o empresario que desee iniciar o mejorar su empresa. En términos simples, un modelo de negocios es una descripción de cómo una empresa crea, entrega y capta valor (Osterwalder et al., 2015). En otras palabras, es la forma en que una empresa genera ingresos y beneficios.

Por otro lado, la evaluación de la viabilidad financiera ofrece una perspectiva más rigurosa y basada en datos cuantitativos sobre la rentabilidad de la empresa (Martín et al., 2010). Este análisis se centra en números tangibles, proyecciones financieras y otros indicadores clave que fundamentan la sostenibilidad económica de la operación (Martín et al., 2010).

Sin embargo, para una evaluación inicial de la rentabilidad de la empresa, desglosar la viabilidad financiera en los mismos nueve bloques del lienzo Canvas, revela una herramienta más efectiva y completa (Tabla: 1), ya que combina la visión conceptual proporcionada por el lienzo Canvas con el rigor financiero de la evaluación de viabilidad.

En un caso práctico esta combinación se aplicó un análisis a un fermentador electrodoméstico. Al desglosar los nueve bloques del lienzo Canvas y evaluar la viabilidad financiera en cada uno de ellos, se logró demostrar de manera concreta y cuantitativa que el producto tiene un potencial sólido para ser lanzado al mercado. Las proyecciones y propuestas respaldadas por datos numéricos respaldan la certeza de que el producto será bien recibido por parte de los consumidores y, por tanto, representa una oportunidad de negocio viable y atractiva.

Aspecto	Business Model Canvas	Análisis de Viabilidad Financiera
Enfoque Principal	Descripción del modelo de negocio en términos generales y visuales.	Evaluación de la sostenibilidad financiera del proyecto o empresa.
Áreas Clave	9 bloques clave que cubren aspectos como propuesta de valor, segmentos de clientes, canales de distribución, etc.	Enfoque en estados financieros clave como ingresos, costos, beneficios, flujos de efectivo, etc.
Naturaleza	Descriptivo y visual.	Cuantitativo y analítico.
Propósito	Identificar oportunidades y desafíos en el modelo de negocio.	Evaluar la capacidad financiera para generar beneficios y retorno de inversión.
Usuario Principal	Equipo de gestión, emprendedores, socios, inversores.	Financieros, inversores, analistas.
Fase de Desarrollo	Principalmente utilizado en las etapas iniciales de planificación.	Aplicado en todas las etapas, desde la planificación hasta la ejecución y el monitoreo continuo.

Fig. 1. Tabla 1: Comparativa del Modelo Canvas y la Viabilidad Financiera.

⋆

ISSN: 2992-8338

2. BLOQUE 1: SEGMENTO DE MERCADO

En el análisis del segmento de mercado, se tomó como referencia la ciudad de Cuernavaca, Morelos, la cual cuenta con una población total de 376,494 habitantes según datos del INEGI (INE, 2023) como se muestra en la (Figura 2 y 3).

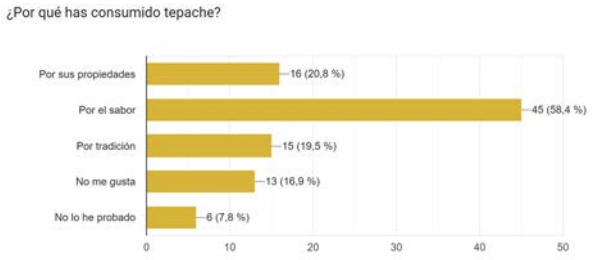


Fig. 2. La encuesta permite identificar la necesidad y motivo de compra.

Fig. 3. La encuesta muestra el nivel de interés por adquirir el fermentador electrodoméstico .

Para determinar el número adecuado de personas a encuestar, se utilizó la fórmula del tamaño de muestra poblacional como se muestra en la (Figura 4). El cálculo resultó en la necesidad de encuestar a 384 personas para obtener datos representativos y significativos (Mateu and Casal, 2003).

N	Universo	376,494
n	Muestra	384
p	Probabilidad a favor	0.5
q	Probabilidad en contra	0.5
z	Nivel de confianza	1.96
e	Error de estimación	5%

Fig. 4. Datos para desarrollar la formula del tamaño de muestra.

$$n = \frac{x^2 Npq}{e^2(N-1) + z^2 pq}. \quad (1)$$

$$n = \frac{(1.96)^2(376,494)(0.5)(0.5)}{[[(0.05)^2(376,494) + [(1.96)^2(0.5)(0.5)]]}. \quad (2)$$

3. BLOQUE 2: PROPUESTA DE VALOR

El electrodoméstico tiene como objetivo principal fermentar bebidas a base de frutos dulces, siguiendo el proceso tradicional que implica la colocación de fruta, agua, panela y bacteria kéfir en el recipiente del fermentador (Osterwalder et al., 2015).

La innovación tecnológica radica en modernizar este proceso tradicional, permitiendo la producción de una bebida de manera consistente y en un tiempo de fermentación reducido. Además, el electrodoméstico cuenta con un monitoreo y control automatizado del pH y la temperatura, lo que facilita la activación o desactivación del proceso de fermentación, como se muestra en la (Figura 5).

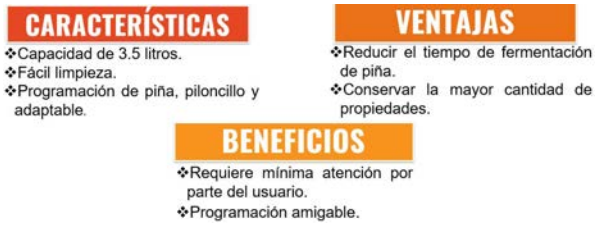


Fig. 5. Puntos relevantes tomados en cuenta en un fermentador electrodoméstico.

Adicionalmente, el fermentador automatizado ofrece otros beneficios, como producción de vinagre y la fermentación de otros elementos como la kombucha. Esto se logra mediante la definición de parámetros que aseguran un rango adecuado de fermentación, lo que resulta en una bebida con un mayor contenido de propiedades beneficiosas.

4. BLOQUE 3: CANALES DE DISTRIBUCIÓN

La distribución juega un papel crucial en la estrategia de ventas, y puede ser determinante para alcanzar los beneficios deseados. Inicialmente, considerando que el fermentador puede no ser un producto muy popular en el mercado, invertir en logística desde el principio o pagar a establecimientos para su exhibición puede no ser la mejor opción. Por lo tanto, se recomienda aprovechar las plataformas en línea, ya que facilitan la difusión de información sobre la innovación, forma de entrega, almacenamiento y todo lo relacionado con la pos venta, incluyendo reembolsos y atención al cliente. Además, permiten llegar a un universo de mercado mucho más amplio (Acosta, 2017).

5. BLOQUE 4: RELACIÓN CON EL CLIENTE

La transparencia empresarial es un pilar fundamental en la actualidad. No solo genera confianza en los usuarios, sino también en futuros colaboradores, y amplía el alcance en el mercado (Mesonero and Alcaide, 2012). Conocer a fondo al cliente es esencial, ya que al ofrecer un producto, el objetivo primordial es lograr su satisfacción, lo que a su vez puede resultar en ventas recurrentes o recomendaciones de boca en boca, las redes sociales populares no es para depender el ingreso principal de ventas, sino para mostrar una empresa transparente solamente y no una fantasma (Figura 6).

Además, la recopilación y análisis de los datos generados por los usuarios permite elaborar un análisis FODA. Esta herramienta estratégica se utiliza para mantener a la empresa en constante actualización con el mercado. Proporciona perspectivas valiosas sobre áreas de mejora,

ISSN: 2992-8338

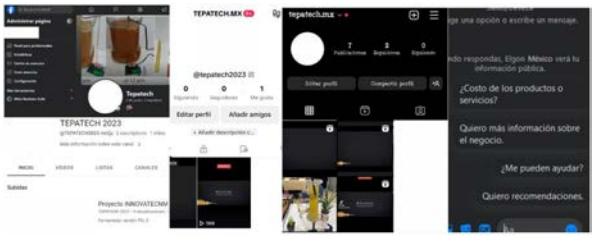


Fig. 6. Las plataformas en donde se comparte al público deben ser de las más populares.

oportunidades a explorar, fortalezas a capitalizar y posibles amenazas a considerar. Es una práctica esencial para mantener la competitividad y relevancia en el entorno empresarial actual (Sarli et al., 2015).

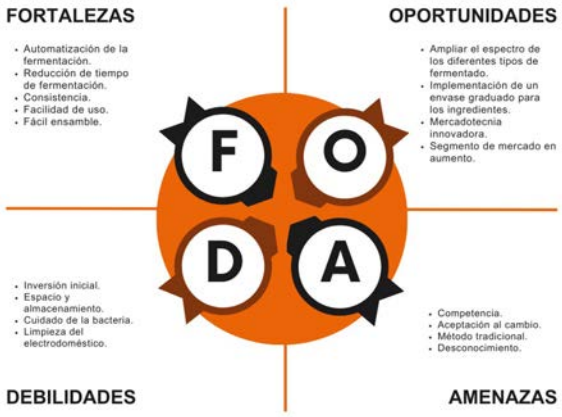


Fig. 7. Análisis FODA aplicado a un fermentador electrodoméstico.

6. BLOQUE 5: RECURSO CLAVE

Determinar la inversión necesaria para llevar a cabo un proyecto es esencial y requiere un análisis financiero detallado. Para lograrlo, es fundamental elaborar un balance general que incluya los costos fijos, los costos totales, así como otros gastos y el IVA. Esta suma proporcionará una visión completa de los recursos requeridos (González Huerta, 2015).

Al obtener esta cifra, se podrá establecer un precio de venta que permita cubrir los costos y, al mismo tiempo, generar un margen de ganancia adecuado. Es importante destacar que este proceso de evaluación es crucial para garantizar la viabilidad financiera del proyecto y evitar posibles pérdidas.

Además, este enfoque permite una planificación más precisa, ya que brinda una visión clara de los recursos necesarios para llevar a cabo la inversión. Así, se puede tomar decisiones informadas y diseñar estrategias efectivas para la implementación y desarrollo del proyecto.

En resumen, la elaboración de un balance general es una herramienta invaluable para determinar la inversión requerida y, en última instancia, establecer un precio de venta que asegure la rentabilidad del proyecto. Este proceso de evaluación financiera proporciona una base sólida para la toma de decisiones y la planificación estratégica.

7. BLOQUE 6: ACTIVIDADES CLAVE

Una vez que se planea implementar la empresa, es recomendable realizar una distribución de la planta. Esto permite ubicar y organizar los diferentes elementos de acuerdo al proceso de producción. El objetivo es lograr una producción fluida y evitar posibles conflictos en el proceso o la generación de cuellos de botella.

7.1 Integración Normativa, Tecnología y Disponibilidad de Componentes en el fermentador electrodoméstico.

Normas del Área de Trabajo:

NOM-017-STPS-2008

Esta norma establece las condiciones mínimas de seguridad y salud en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen productos químicos capaces de generar contaminantes en el ambiente laboral.

NOM-002-STPS-2010

Esta norma tiene como objetivo establecer las condiciones mínimas de seguridad en los centros de trabajo donde se manejen sustancias químicas capaces de generar contaminantes en el ambiente laboral.

Normas ISO Opcionales:

ISO-45001-2008

Esta norma especifica los requisitos para un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo (SGSST), proporcionando orientación para su uso y permitiendo a las organizaciones proporcionar lugares de trabajo seguros y saludables, al prevenir lesiones y problemas de salud relacionados con el trabajo.

ISO-9001-2015

Esta norma se centra en establecer los criterios para un sistema de gestión de calidad. Ayuda a las organizaciones a cumplir con las expectativas de sus clientes y mejorar continuamente su desempeño.

Normas del Electrodoméstico:

NOM-024-SCFI-1998

Esta norma establece las especificaciones de seguridad y métodos de prueba para los electrodomésticos eléctricos de uso doméstico y análogos.

NOM-001-SCFI-2018

Esta norma establece las características de seguridad y etiquetado para productos electrónicos. Estas normas proveen un marco regulatorio y de calidad que asegura que el fermentador electrodoméstico cumple con los estándares necesarios en seguridad, salud, calidad y medio ambiente. Cumplir con estas normas es esencial para la comercialización y garantía de seguridad en el mercado.

Innovación en la Producción con Impresión en 3D: El proyecto incorpora tecnología de impresión en 3D para

ISSN: 2992-8338

partes críticas del circuito, como la caja del sistema de programación. Esta versatilidad en modelos, materiales y dimensiones garantiza funcionalidad y estética. La adopción de la impresión en 3D refleja un enfoque innovador en la producción.

Accesibilidad de Componentes y Programación: El prototipo y su programación se benefician de la fácil adquisición de componentes en el país, incluso en la misma localidad. La elección de un software y lenguaje de código abierto para la programación asegura un acceso sencillo y amplio a la tecnología clave del sistema. Aunque la placa PCB se fabrica de manera personalizada, el enfoque en componentes accesibles y tecnologías abiertas aumenta la viabilidad del proyecto.

La combinación de cumplimiento normativo, tecnología de innovación y enfoque en accesibilidad y apertura tecnológica demuestra la robustez y viabilidad del fermentador electrodoméstico. La adhesión a normas oficiales garantiza la calidad y seguridad del producto. La adopción de impresión en 3D y la elección de tecnologías abiertas refuerzan la innovación y accesibilidad del proyecto en su conjunto.

7.2 Nivel de madurez tecnológica TRL

El proceso de desarrollo y validación de un proyecto es una etapa crucial en la materialización de cualquier idea innovadora. Se compone de una serie de pasos clave que garantizan tanto la viabilidad técnica como el cumplimiento de los estándares de calidad y rendimiento necesarios. Desde el diseño detallado y la creación de un prototipo funcional hasta la evaluación en condiciones reales y la integración de sistemas, cada fase juega un papel fundamental en el éxito final del proyecto. Además, es imperativo asegurarse de que el producto cumple con las normativas y regulaciones aplicables desde sus etapas iniciales. En este contexto, exploró a detalle cada uno de estos pasos, destacando su importancia en el proceso de desarrollo y validación de proyectos innovadores (Figura: 8).

Diseño Avanzado y Prototipo Funcional:

El fermentador electrodoméstico tiene un diseño detallado del producto y sistema, seguido de la creación de un prototipo funcional. Esto permite evaluar su viabilidad y funcionalidad.

Evaluación en Condiciones Reales:

El prototipo se somete a pruebas en condiciones reales o simuladas que imitan el entorno de uso previsto. Esto proporciona datos reales sobre su desempeño.

Validación de Rendimiento (Objetivo):

Se establecen criterios específicos de rendimiento y se evalúa si el prototipo cumple con esos objetivos. Esto asegura que el producto cumpla con las expectativas.

Integración de Sistemas (Automatización):

Si el proyecto involucra varios componentes o sistemas, se integran y se verifica que funcionen de manera conjunta de manera eficiente y efectiva. La automatización puede ser clave en esta fase.

Cumplimiento de Normativas Iniciales:

Se verifica que el diseño y funcionamiento del producto cumplan con las regulaciones y normativas aplicables. Esto garantiza la seguridad y legalidad del producto.

Estos pasos son esenciales para desarrollar y validar con éxito un proyecto, asegurando que cumpla con los estándares de calidad y rendimiento requeridos, sin embargo, cumplir con los siguientes tres niveles se requiere ir transformando a un producto totalmente comercial dejando de lado la parte visual de un prototipo, cumpliendo con las normas oficiales mexicanas, así como el completo funcionamiento del mismo.

Fig. 8. Muestra actual de la ubicación del fermentador electrodoméstico después del análisis, TRL 6.

7.3 Propiedad intelectual

La protección de un producto (GOO, 2023) antes de su lanzamiento al mercado es un paso crítico en el proceso de innovación y emprendimiento. No sólo resguarda la propiedad intelectual y los derechos del creador (MAR, 2023b), sino que también evita posibles disputas legales en el futuro. Un producto no protegido puede ser susceptible de ser registrado o copiado por terceros, lo que podría resultar en la pérdida de derechos exclusivos sobre el mismo (MAR, 2023a).

En el caso específico de un logotipo, su registro es esencial para asegurar que su identidad gráfica no esté siendo utilizada por otras entidades o empresas. Este proceso es especialmente relevante en el contexto de México, donde el registro de marcas y logotipos se rige por regulaciones específicas. Asegurarse de que el logotipo, marca y eslogan son únicos y no tienen registros previos en el país, es fundamental para garantizar una comercialización segura y confiable del producto.

En resumen, la protección legal de un producto, incluyendo su logotipo, es un componente esencial en el proceso de lanzamiento al mercado. Esto no solo salvaguarda los derechos del creador, sino que también establece una base sólida para el éxito y la confiabilidad del producto en el mercado.

7.4 Diagramas de procesos de fabricación

Antes de iniciar la producción de cualquier artículo, es crucial comprender la capacidad operativa de la empresa (Gutiérrez Pulido et al., 2014). Esto implica realizar un análisis detallado que permita determinar cuántos fermentadores electrodomésticos, en este caso, pueden ser fabricados en un periodo de tiempo específico. Para llevar a cabo esta evaluación, se recurre a herramientas como los diagramas de operaciones, los bimanuales y los manuales de procesos.

Estos instrumentos proporcionan una visión detallada de las actividades involucradas en la fabricación, permitiendo identificar cuellos de botella, optimizar procesos y calcular la capacidad productiva en días laborales. Además, este

ISSN: 2992-8338

análisis no se limita a un periodo corto, sino que proyecta la producción a lo largo de un mes, brindando una perspectiva más completa y precisa.

Detalles del método (Actual / Propuesto)	Operación ○	Transporte ⇨	Inspección □	Demora D	Almacén ▽	Distancia en metros	Cantidad de herramienta	Tiempo en minutos	Observaciones
1.- Traer material a la mesa de trabajo (olla), tuercas y perica.					X	4m	3	10	Olla, tubo de 5/16, tuerca de ½, perica.
2.- Doblar el tubo de 5/16 con tubos de torque.	X						9	30	Hacer uso de tornillo de banco para el dobles.
3.-Asegurarse que el tubo se encuentra a 90°			X					15	Verificar que se encuentra bien doblado que evite el flujo.
4. Traer teflón y empaques.					X	4m	4	10	Teflón y empaques de plástico y madera.
5.- Colocar teflón, empaques y cortar madera de base.	X						1	20	Poner teflón a tubo 5/16, empaques ½ y cortar madera.
Enroscar tuercas a tubo doblado.	X							25	Poner tuerca a tubo de 5/16 y enroscar en ½.
7.- Verificar fugas.			X					20	Verificar que se eviten fugas de fluido.
8.-Traer sensores de pH y temperatura, además del Arduino y pantalla LCD.					X	4m	4	30	Sensor de pH, temperatura, pantalla LCD para Arduino y Arduino.
9.-Cargar programa al Arduino con el uso de una computadora	X						1	30	Hacer uso del software de Arduino.
10.- Prender todo el sistema.			X					30	Verificar el funcionamiento de los sensores y fluido.
11.- llevar al área de producto terminado		X				3m		10	Colocar el fermentador en los anaqueles.
Total	4	1	3		3	12m	25	230	

RESUMEN	ACTUAL No.	ACTUAL Tiempo (min.)	DISTANCIA (m)
○	4	105	
⇨	1	10	3
□	3	65	
▽	3	50	12
TOTAL	11	230	15

Fig. 9. Diagrama de flujo industrial, muestra el tiempo de producción de un fermentador).

De esta manera, se establece una base sólida para la planificación de la producción, asegurando que la empresa opere de manera eficiente y pueda satisfacer la demanda del mercado de manera efectiva. Esta capacidad de producción proyectada es esencial para mantener un flujo constante y satisfacer las necesidades de los clientes de manera oportuna y eficaz (Figura 10) .

8. BLOQUE 7: SOCIOS CLAVE

Después de tener una comprensión clara de los gastos involucrados, es crucial establecer relaciones con socios clave. Estos socios desempeñarán un papel fundamental al garantizar una adquisición constante y confiable de materia prima. Para ello, es esencial llegar a acuerdos que definan los estándares de calidad y los rangos de aceptación.

PRODUCTO TERMINADO			DIAS INHABILES				
MES	DÍAS					PRODUCCIÓN ESTIMADA	
	L	M	M	J	V	CANTIDAD / PRODUCCIÓN	IMPORTE
ABRIL			1	2	3	20	$ 251,680
	6	7	8	9	10		
	13	14	15	16	17		
	20	21	22	23	24		
	27	28					
TOTAL						20	$ 251,680

Fig. 10. Muestra la proyección de fermentadores electrodomésticos que se pueden fabricar por mes (capacidad de producción).

Estos convenios no solo brindarán estabilidad en el suministro de materiales, sino que también establecerán parámetros claros para el control de calidad. Esto asegurará que los insumos cumplan con los estándares requeridos para la producción. Al mantener una comunicación abierta y una colaboración efectiva con los socios clave, se fortalece la cadena de suministro y se garantiza una producción consistente y de alta calidad.

Esta colaboración estratégica no solo beneficia al proyecto en términos de suministro confiable, sino que también puede abrir puertas a oportunidades de crecimiento y expansión a largo plazo. Además, al contar con socios confiables y comprometidos, se establece una base sólida para enfrentar los desafíos y aprovechar al máximo las oportunidades del mercado. Los socios clave que son de importancia para el fermentador electrodoméstico, es el que maquila el acero inoxidable para darle vida al diseño del fermentador, así como el proveedor de la bacteria kéfir.

9. BLOQUE 8: FLUJO DE INGRESOS

Los ingresos generados estarán directamente relacionados con el tipo de oferta que la empresa presente al mercado, ya sea un servicio o un producto. En el caso específico que nos ocupa, se trata del fermentador electrodoméstico y sus accesorios (Figura 11).

Fig. 11. Fermentador electrodoméstico y sus accesorios representan el flujo de ingresos.

Es fundamental tener en cuenta el precio de venta de cada unidad, así como el volumen proyectado de ven-

ISSN: 2992-8338

tas. Además, es necesario considerar posibles fuentes adicionales de ingresos, como servicios complementarios o productos relacionados.

Asimismo, es importante estar al tanto de la competencia y realizar un análisis de mercado para determinar el precio adecuado y la estrategia de precios que permita maximizar los ingresos y mantener la competitividad.

10. BLOQUE 9: ESTRUCTURA DE COSTOS

Una vez asegurados los recursos y establecidas relaciones con socios clave, es imperativo llevar a cabo una evaluación exhaustiva para determinar la viabilidad y rentabilidad del proyecto. Esto implica realizar un análisis detallado de los recursos disponibles y identificar posibles áreas de mejora o ajustes necesarios. La finalidad es asegurarse de que el proyecto esté en condiciones óptimas para alcanzar el objetivo (Figura 12).

Concepto	Costo total mensual
Materia prima	$ 146.193,60
Envases y embalajes	$ 2.023,00
Mano de obra directa	$ 14.400,00
Energía eléctrica	$ 250,58
Renta	4.908,00 $
Total	$ 167.775,18
iva 16%	$ 26.844,03
CON IMP	$ 194.619,20
C/U	$ 8.388,76
precio de venta	$ 12.583,14

Fig. 12. Muestra el balance general aplicado al fermentador electrodoméstico.

En esta etapa, es crucial realizar proyecciones de ventas basadas en el segmento de mercado y otros factores relevantes. Esto proporcionará una visión clara de las posibles ventas por mes y permitirá anticipar la demanda y ajustar la producción en consecuencia.

Sin embargo, la toma de decisiones final sobre la viabilidad y rentabilidad del proyecto recae en indicadores clave como el TIR (Tasa Interna de Retorno) y el VAN (Valor Actual Neto) considerando una tasa de descuento del 16 %Èstos indicadores financieros proporcionan una evaluación cuantitativa de la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo. Un TIR positivo y un VAN superior a cero indican que el proyecto puede ser considerado rentable y viable desde el punto de vista financiero (Figura 13).

TEPATECH DE 3.5L	INVERSION INICIAL	VENTAS POR AÑO		
167.780 $	0	1	2	3
TIR	34%			
VAN				666.041 $
INGRESOS	2.013.360 $	3.020.160 $	3.517.540 $	4.401.900 $
EGRESOS		2.013.360 $	2.344.940 $	2.934.600 $
FNE	- 2.013.360 $	1.006.800 $	1.172.600 $	1.467.300 $
MÁQUINAS ANUALES		240	260	300
MÁQUINA POR MES		20	22	25
PRECIO UNITARIO CON INFLACIÓN		8.389 $	9.019 $	9.782 $
PRECIO DE VENTA CON INFLACIÓN		12.584 $	13.529 $	14.673 $

Fig. 13. Muestra la proyección a 3 años de fermentadores electrodomésticos para poder determinar el TIR y el VAN

10.1 Punto de equilibrio

Una vez que se ha detallado la estructura de costos, es crucial calcular el punto de equilibrio. Este punto representa el nivel de ventas necesario para cubrir todos los costos y comenzar a generar ganancias. Identificar este momento es esencial para la gestión financiera y la toma de decisiones estratégicas. Donde:

- P= Precio de venta
- U= Unidades a vender
- CVU= Costo Variable Unitario
- CF= Costos Fijos

$$CVU = \frac{costosdeproducción}{númerodeunidadesproducidas}. \quad (3)$$

$$CVU = \frac{148,217}{20} = 7,410.85 = \$\ 7,411. \quad (4)$$

$$P = CVU(100/100 - TIR). \quad (5)$$

$$P = 7,411(100/100 - 34) = 741,100/66 = \$\ 11,229. \quad (6)$$

$$(PxU) - (CVUxU) - CF = 0. \quad (7)$$

$$(11,229xU) - (7,411xU) - 19,559 = 0. \quad (8)$$

$$(3,818xU) = 19,559. \quad (9)$$

$$U = \frac{19,559}{3,818} = 5.12uds. \quad (10)$$

Calcular el punto de equilibrio implica analizar los costos fijos y variables, así como los precios de venta y el volumen de ventas estimado. Este análisis permite determinar cuántos productos o servicios deben venderse para cubrir todos los gastos y alcanzar el equilibrio financiero (Negocios, 2012).

Una vez que se ha superado el punto de equilibrio, cada venta adicional contribuirá directamente a las ganancias. Por lo tanto, es crucial monitorear de cerca las ventas y los costos para asegurarse de mantener un margen de beneficio saludable.

ISSN: 2992-8338

11. CONCLUSIÓN

La fusión del lienzo canvas y la viabilidad financiera en el caso práctico del fermentador electrodoméstico ha demostrado ser una estrategia efectiva para el desarrollo y lanzamiento al mercado de este innovador producto. Al combinar la capacidad del lienzo canvas para proporcionar una visión general con la rigurosidad de la viabilidad financiera, se ha logrado un modelo de negocios detallado y fundamentado en datos con el objetivo de garantizar su éxito en el mercado. Esta sinergia entre ambos enfoques ha permitido una comprensión más completa y precisa de los elementos clave para la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto. En última instancia, esta integración ha sentado las bases para una estrategia empresarial sólida y viable, respaldada tanto por la visión estratégica del lienzo canvas como por el respaldo financiero de la viabilidad económica.

REFERENCES

(2023). Google patents. URL `patents.google.com`. Fecha de Acceso: 1 de noviembre de 2023.

(2023). Inegi. URL `cuentame.inegi.org.mx`. Fecha de Acceso: 1 de noviembre de 2023.

(2023a). Marcia. URL `marcia.impi.gob.mx`. Fecha de Acceso: 1 de noviembre de 2023.

(2023b). Markanet. URL `acervomarcas.impi.gob.mx`. Fecha de Acceso: 1 de noviembre de 2023.

Acosta, A.L. (2017). Canales de distribución.

González Huerta, P. (2015). La viabilidad financiera en el emprendimiento.

Gutiérrez Pulido, H. et al. (2014). Calidad y productividad.

Martín, V.G., Ruíz, A.J.C., and Soto, J.D. (2010). *Viabilidad financiera de la empresa de negocios*. Tirant lo blanch.

Mateu, E. and Casal, J. (2003). Tamaño de la muestra. *Rev Epidem Med Prev*, 1(4), 8–14.

Mesonero, M. and Alcaide, J.C. (2012). *Marketing industrial: cómo orientar la gestión comercial a la relación rentable y duradera con el cliente*. ESIC editorial.

Negocios, C. (2012). El punto de equilibrio. *Obtenido De Https://Nicolasgarzon. Com/Wp-Content/Uploads/2021/08/Paso-A-Paso-De-Punto-De-Equilibrio. Pdf*.

Osterwalder, A., Pigneur, Y., Bernarda, G., Smith, A., and Papadakos, T. (2015). *Diseñando la propuesta de valor*. Leader Summaries.

Sarli, R., Gonzalez, S.I., and Ayres, N. (2015). Análisis foda. una herramienta necesaria. *Revista de la Facultad de Odontología*, 9(1), 17–20.

ISSN: 2992-8338

Web and Mobile Information System supported by Model-Driven Development and Data Mesh architecture for the management of agricultural processes at rural communities.

Urbano Eliécer Gómez-Prada

Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Bucaramanga
Colombia (Tel: 316-750-2899; e-mail urbano.gomez@upb.edu.co)

Abstract: This document presents a Web and Mobile Information System that favors the management of agricultural activities in rural communities. The set of software tools that make up the system has been called "ICT Ecosystem for Agriculture" and it is part of a strategy to support the ICT integration of members of rural communities. The Ecosystem is supported by Model-Driven Development, it is made up of a web application, a REST API, and some Apps that fulfills a single functionality to reduce the complexity of use and provide ease of adoption to mitigate resistance and cultural roots. The architecture structure responds to a multi-level distributed system using client/server technology and separates the business logic and it is based on DataSnap technology whose structure corresponds to the Data Mesh architectural approach to manage distributed and scalable data sets by dividing data domains in the mobile and giving access to them from service levels. The ecosystem is integrated through the web application that generates consolidated graphical reports in addition to those of the App.

Keywords: Agricultural Process Management, Data Mesh, DataSnap, Model-Driven Development, Rad Studio, REST API, Information System, Rural Communities.

1. INTRODUCCION

Este artículo describe un Sistema de Información Web y Móvil llamado EcoTicAgro como acrónimo de Ecosistema TIC para la Agricultura, para la gestión de procesos agrícolas que buscan cerrar brechas de TI en el agro y por eso tienen desescalado tecnológico.

EcoTicAgro está conformado por una plataforma web, una API REST y un conjunto de Apps. En este documento se describen las tecnologías que se tuvieron en cuenta para su desarrollo y son resultado de una investigación que en la fase actual tiene por propósito de brindar disponibilidad del sistema para proceder con la estrategia de apropiación por para de una comunidad rural que inicia su proceso de adopción que se apoyará en gamificación.

Las Apps funcionan de manera asíncrona y cuando acceso a internet, síncrona para la migración de datos a un servidor AWS al que se accede mediante el aplicativo web cuyo primer prototipo surgió con desarrollo orientado por modelos (MDD) desde donde se generan los mismos informes de la App, pero tambien informes consolidados y de seguimiento realizado por el líder de la estrategia.

Las Apps cumplen funcionalidad de registro y consulta sobre Actividades Comerciales, Clima, Activos, Costos, Proyectos y Actividades comunitarias, seguimiento a actividades de producción y/o transformación y consulta de normativas, entre otras. Las funciones del ecosistema se dividieron para mejorar escalabilidad y agilidad en la gestión de datos siguiendo la arquitectura Data Mesh.

Para facilitar el uso, cada App sigue el mismo modo de su uso, aunque sea diferente proceso agrícola el que ayuda a controlar, es cuestión de registrar o consultar de manera tabular los registros de la operación y exportar o importar los registros, pero los datos de las App se concentran en una misma base de datos para el análisis de la información.

2. MARCO DE REFERENCIA

Los sistemas de información son un conjunto de varios componentes orientados a la gestión de datos que generan información (Pressman, 2014) considerado en este caso es como ecosistema formado por una plataforma web, una API REST y un conjunto de Apps.

El ecosistema está dirigido a campesinos en comunidades rurales y que por ahora en la fase de disponibilidad y buscan convertirse en una alternativa para apoyar el desarrollo rural en el marco de un proyecto de investigación alineado a expectativas como las expresadas por (Tambotoh, Manuputty, & Banunaek, 2015), en cuanto a la premisa de que la utilización de las TIC tiene la capacidad de abordar los problemas de desarrollo en las zonas rurales y requiere adopción, en la que se brinda al usuario la capacidad de manejar herramientas TI, mejorando el sentido de pertenencia hacia estas tecnologías y otorgando autonomía que permita al usuario reconocer las necesidades e intereses individuales y

ISSN: 2992-8338

organizacionales que las TI satisfacen (Simpson, Tuck, & Bellamy, 2004).

2.1. MARCO TECNOLÓGICO

EcoTicAgro tiene tres elementos el aplicativo web, el servidor REST y las Apps para Android o Windows o IOS o Linux. El marco tecnológico seré presentado según estos tres grupos.

2.1.1. MDD para aplicativos Web soportados en Laravel

El aplicativo web de EcoTicAgro fue desarrollado siguiendo el Model-Driven Development Web (MDD-W) del que se partió con un modelo que representa la lógica de operación logrando lo definido por (Sferruzza, Rocheteau, Attiogbé, & Lanoix, 2018): brindar coherencia entre el diseño al usarlo para generar el código.

En este proyecto se siguió el enfoque MDD-W se generó un primer prototipo del aplicativo en Laravel, un marco de trabajo que responde al patrón MVC, fomenta el desarrollo de aplicaciones web orientadas al modelo (Cíceri, 2019) y permite vincular herramientas como Eclipse de manera similar a como lo expresa Ražinskas & Čeponienė (2022) quienes también generaron código Laravel a partir de diagramas UML con transformaciones MDD para Laravel.

MDD mejora el proceso de desarrollo ya que proporcionan una definición detallada del concepto teórico propuesto y su implementación, mediante la definición de perfiles, reglas de transformación y algoritmos.

2.1.2. Data Mesh

Data Mesh es un enfoque arquitectónico y organizativo para gestionar conjuntos de datos distribuidos y escalables en donde cada conjunto es manejado por un equipo autónomo que genera datos en productos con propiedad y responsabilidad específica que generan una infraestructura es distribuida (Machado, Costa, & Santos, 2022), cubierta en este proyecto por cada App.

2.1.3. Servicios REST

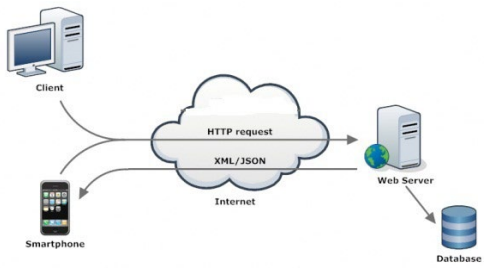
Para el servidor REST y las Apps se usó RAD Studio, un entorno de desarrollo integrado (IDE) de la empresa Embarcadero que incluye herramientas y lenguajes para el desarrollo de aplicaciones multiplataforma como Delphi, un lenguaje de programación de alto nivel utilizado para crear aplicaciones para Windows (Embarcadero Technologies, 2018).

En RAD Studio con Delphi, se puede crear un servidor REST utilizando la biblioteca de componentes DataSnap de Delphi (Embarcadero Technologies, 2018), una tecnología de middleware, con entornos de desarrollo de software de Delphi y C++Builder (Guo & Zhang, 2012), los cuales permiten construir aplicaciones de servidor para proporcionar servicios web utilizando tecnología REST, un tipo de servidor web que proporciona servicios web a través de una API. REST es un acrónimo de Representational State Transfer y es un estilo arquitectónico para construir servicios web en donde el trabajo se concentra en proporcionar el acceso a los datos subyacentes mediante la configuración de los componentes TDataSetProvider y TDataSetProviderAdapter.

DataSnap permite el desarrollo de aplicaciones distribuidas que se comunican a través de la red utilizando una arquitectura multicapa para transferir datos y llamar procedimientos remotos entre el cliente y el servidor; utilizando protocolos de comunicación como HTTPS (Guo & Zhang, 2012).

Un ejemplo de la estructura básica de los servicios web REST es presentado en la figura 1, en ella se aprecia que los clientes web y móvil se conectan mediante peticiones http al servidor web para comunicar archivos XML o Json.

Figura 1. Estructura básica del servicio web REST.



Fuente: Adaptado de Fielding (2000)

En términos generales, una API REST es un conjunto de rutas y métodos HTTP que permiten a los clientes realizar operaciones en recursos específicos en un servidor. En el caso de Delphi con DataSnap, la aplicación del servidor actúa como el proveedor de datos y la *API REST* proporciona una interfaz para que los clientes (por ejemplo, aplicaciones móviles, aplicaciones web) puedan interactuar con los datos.

Para construir un servidor REST con Delphi, se siguen estos pasos generales (Embarcadero Technologies, 2018):

1. Generar proyecto de servidor DataSnap en Delphi.
2. Agregar un objeto DataSnap REST al proyecto.
3. Definir los métodos de servicio que proporcionan y configuran la interfaz REST para exponerlos.
4. Implementar la lógica del servicio en los métodos de servicio definidos.
5. Configurar la aplicación del servidor para utilizar la API REST. Para ello, se debe agregar un componente TRESTService a la aplicación del servidor y configurarlo para que utilice la clase de métodos del paso anterior.
6. Configurar los componentes TDataSetProvider y TDataSetProviderAdapter. Estos componentes son responsables de proporcionar el acceso a los datos subyacentes y convertir los datos en un formato que pueda ser utilizado por la API REST.
7. Compilar y ejecutar la aplicación del servidor.
8. Una vez que el servidor está en ejecución, los clientes pueden interactuar con los datos utilizando las rutas y métodos HTTP definidos en la API REST.

ISSN: 2992-8338

Una vez creado el servidor REST, se pueden utilizar varias herramientas para pruebas, como el explorador de servicios REST integrado en el IDE o herramientas externas como Postman (Embarcadero Technologies, 2022).

2.1.4. Apps

Tanto el servicio REST como las Apps están desarrolladas con Rad Studio, un entorno de programación para desarrollar aplicaciones nativas multiplataforma con servicios flexibles de nube y amplia conectividad para Linux, Windows, Mac y Android, con varios gestores de bases de datos, es compatible con Delphi o C++ *(Lazurchak, Vdovychyn, & Zhydyk, 2020) en donde se utiliza el diseñador de formularios para diseñar* la interfaz de usuario, y el primer prototipo surge de arrastrar y soltar componentes que controlan el comportamiento de la aplicación y en donde tambien se usó LiveBindings, una tecnología de Rad Studio que permite conectar elementos de la interfaz con los datos y genera código mejorando la velocidad de implementación.

3. METODOLOGIA

El Desarrollo del sistema de información siguió el proceso unificado racional (RUP) usando casos de uso que permitían la comprensión y aprovechando que es iterativo e incremental a través de ciclos que siguen pasos adaptados según cambios requerdios (Jacobson, Booch, & Rumbaugh, 2000):

1. Definir requerimientos según escenarios y casos de prueba en donde se identificaban los procesos a contemplas en cada App.
2. Especificar modelos que incluye las entidades con sus atributos y diagramas de actividades para seguimiento según los criterios seleccionados y generar el prototipo uno del aplicativo web y de las Apps.
3. Implementar el código según las herramientas de programación escogidas.
4. Revisar el cumplimiento de los requerimientos.

4. RESULTADOS

El Sistema de Información Web y Móvil propone dividir las funcionalidades en diferentes Apps para facilitar el uso por parte de los campesinos y por ello siguen los mismos pasos de operación de manera genérica para cada proceso agrícola que se le quiere apoyar al campesino, es decir:

1. Registrar y listar el evento
2. Generar graficas de consolidados
3. Exportar e Importar registros (requiere Login y tiene opción de recordar contraseña)

Con base en este lineamiento de contar con que las Apps tengan los mismos pasos para el registro del proceso de acuerdo con el evento de la finca. Se propuso una arquitectura Web y Móvil que se presenta en la Figura 2 el cual adapta el diagrama de colaboración de UML. En ella se observan los elementos presentes de una de las A*pps* y del servidor web (controlador, el modelo y vista).

El ecosistema tiene tres grupos de componentes y se presenta en la figura 2, estos son el Sistema de información Web, Los servicios REST, y las Apps. La forma de uso de las herramientas descritas en el marco tecnológico fue:

1. Representa el aplicativo Web, el cual en su primera versión se generó con el framework “Eclipse Modeling Framework” (EMF) que permite convertirlo en una herramienta para el desarrollo basado en modelos (Model-Driven Development - MDD) similar a lo realizado por Ražinskas & Čeponienė (2022) quienes, a partir de modelos de alto nivel que representan la estructura y la lógica genera código, en este caso para PHP soportado en Laravel e incorpora HTML5, PHP y JavaScript, cuenta una base de datos (DB) MySQL.
2. Representa los servicios REST que se implementaron en Rad Studio usando componentes DataSnap.
3. Representa las Apps implementadas en Delphi.

La figura 2 presenta el proceso de consulta de los datos recibidos desde la App con los informes descritos. Tras la migración de los registros, el campesino puede ingresar a consultar en detalle, mediante listados e informes gráficos.

La descripción del proceso que se da en el componente web cuando se consultan los registros se aprecia en la Figura 2:

1. El navegador solicita a la vista los registros por http.
2. El controlador la recibe.
3. El controlador ejecuta la sentencia SQL en el modelo.
4. El modelo hace consulta y entrega datos al controlador
5. El controlador suministra los datos a la Vista.
6. La vista entrega el resultado en el navegador.

La descripción del proceso de recepción de registros de la App se da en Figura 2 así:

1. La App genera un Json con los registros pendiente de migrar del SQLite. los envía por protocolo *http* a la API Res y los marca como migrados
2. La API los recibe y los registra en la base de datos MySQL. También se puede importar. Esta opción requiere login y tiene opción de recordar contraseña).

4.1. Aplicativo Web

Cada usuario tiene acceso a cada una de las Apps en las que se registra, pero los tres primeros actores tienen acceso a lo descrito en las funcionalidades y en los siguientes informes que se dan tras la migración de los datos desde cada una de las Apps y que se consultan en el módulo web. Estos son:

1. Informe de registros migrados a la Web (ver figura 3).
2. Consolidado de Registros por App
3. Informe de Registros por Mes (ver figura 4)
4. Informe de Registros por Usuario
5. Informe por Fecha por Usuario (ver figura 5)
6. Informe de Participación.

ISSN: 2992-8338

El sistema también genera informes para medir el uso que hacen los campesinos. Es una opción implementada para consultar indicadores de manera individual o grupal y hacer seguimiento de la estrategia. El Informe de participación presenta las fechas en que los *usuarios* han ingresado, es un indicador que mide el uso por comunidad o por *campesino*. Un ejemplo se presenta en la Figura 6.

Figura 2. Arquitectura del Sistema de Información

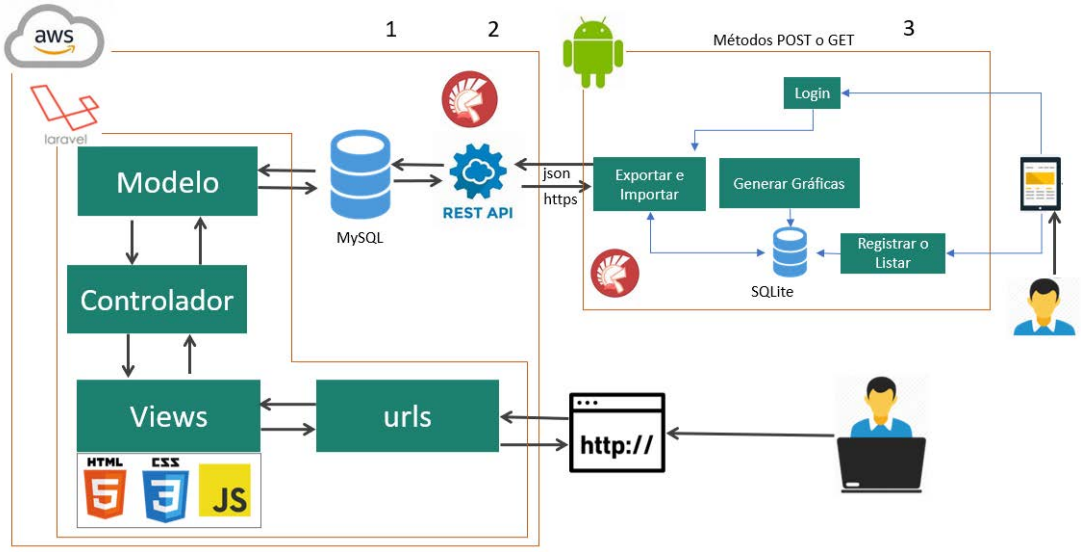


Figura 3. Informe de registros migrados

#	Id	IdPry.	IdAct.	Fecha	Fecha	Observ.	Personas	$	Pers.	Horas	Sincron
1	445	3	4	23-05-13	23-05-13 12:22	-	-	21	0	0	2023-05-18 15:28:59
2	446	6	2	23-05-12	23-05-12 16:30	Documento	David Castro	0	1	1	2023-05-18 15:28:59
3	447	6	7	23-05-18	23-05-18 17:10	Est pry agro	Maria J	0	2	1	2023-05-18 17:13:10

Figura 4. Informe de Registros por Mes

#	Cantidad	Fecha	Id
1	166	23-04	2
2	117	23-05	2

4.3. Apps

Para desescalar de la tecnología cada App cumple con un solo proceso y sigue los mismos pasos y apuntan a una misma base de datos. La figura 8 presenta una Apps en los pasos que sigue:

1. Registrar los datos del proceso o actividad.
2. Registrar datos de manera individual (el usuario es quien escoge si desea registrar los datos en el mismo formulario o si los separa y elige el tamaño de la letra).
3. Generar el informe de registros.
4. Generar los gráficos consolidados por mes.
5. Migrar los registros al Server (hay una opción de conexión que se habilita cuando hay internet.
6. Los procesos que cumplen cada App (en documentos internos se tiene la explicación particular de cada una, hay otras que se están desarrollando) son:

4.2. API REST

Las Apps del ecosistema se comunican a través de Json y cuenta con métodos básicos que las Apps usan para migrar los datos al aplicativo Web y se presentan en la figura 7, en este caso los métodos del ejemplo son: Mostrar, Subir y Login.

Figura 5. Informe de registros por usuario y fecha

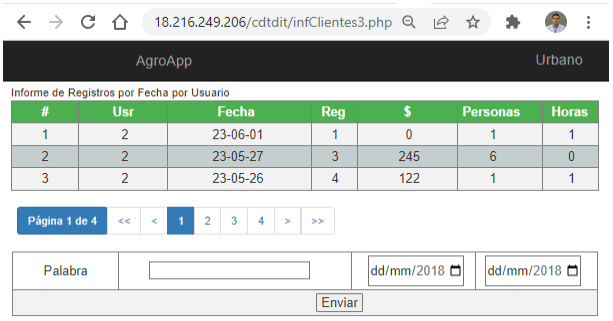
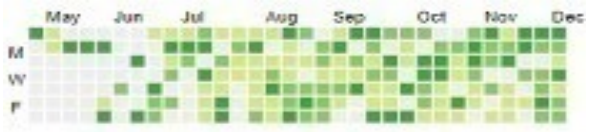


Figura 6. Informe de Participación



1. Gestión de Actividades por proyecto productivo.
2. Gestión de pedidos y compras.
3. Consulta de Normatividad para el Agro.
4. Registro de Lluvia.

ISSN: 2992-8338

Las Apps que se desarrollaron concentran todos los registros a la misma base de datos, que se consulta desde la Web. Los datos de las Apps se migran al aplicativo Web que concentra los datos para futuras consultas.

4.4. Componentes a integrar en las Apps

Para desarrollar las funcionalidades de la App se tienen cuatro componentes implementados primero como Apps para realizarlas pruebas en *Android,* estas integraron a las Apps según la necesidad. Estos componentes son presentados en la figura 9, sus funcionalidades son:

1. Controlar el acceso a la cámara.
2. Acceder a las imágenes de la galería del celular.
3. Hacer reconocimiento de voz para pasarla a texto.
4. Tomar un texto y transformarlo en voz.

Figura 8. Ejemplo de una de las herramientas integradas

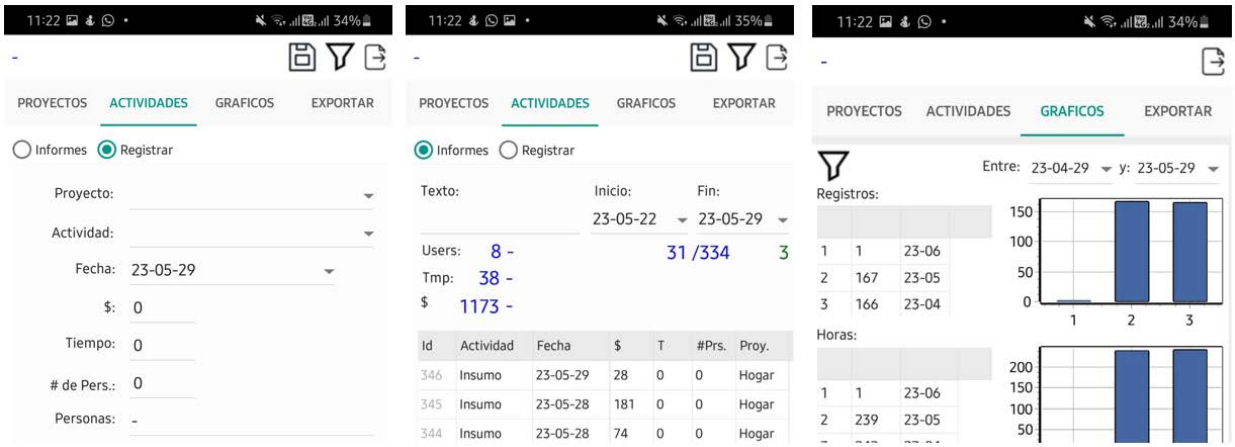


Figura 9. Ejemplo de los componentes para Apps del Ecosistema

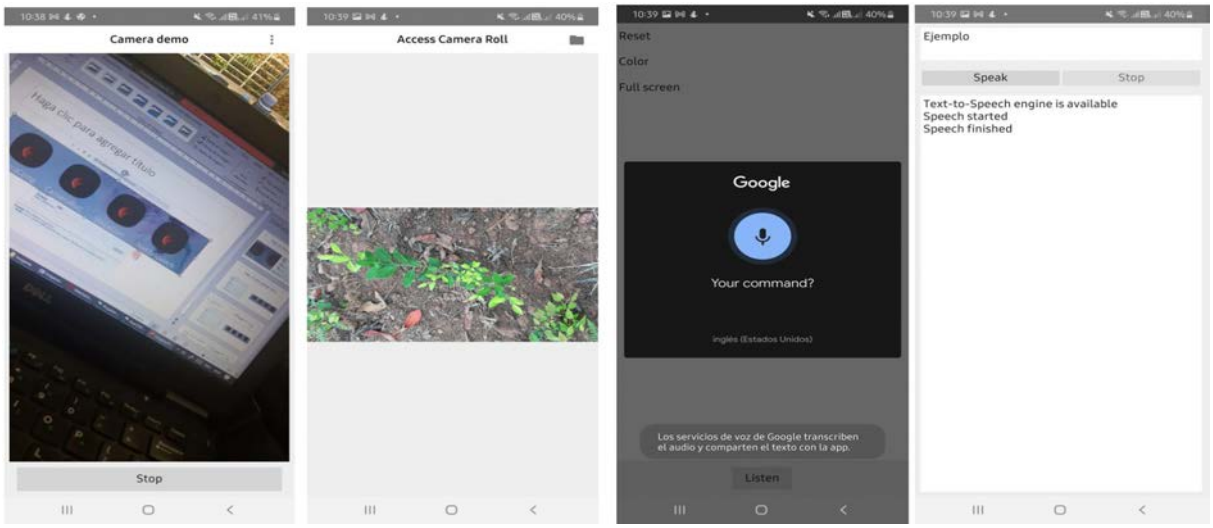
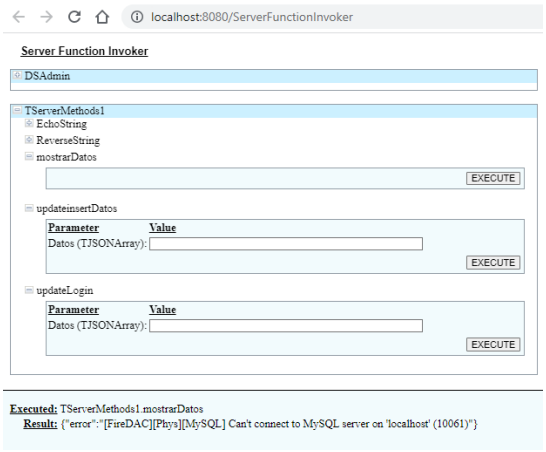


Figura 7. Web para revisar los métodos de la API REST



5. CONCLUSIONES

El proyecto en el que se enmarca el desarrollo de este Ecosistema TIC tiene por propósito apoyar con TIC el sector real por tanto posteriormente al tener las herramientas disponibles, procederá una estrategia de adopción que se apoya en el hecho de que el alcance de las Apps que, aunque ayudan en la gestión de diferentes eventos de un campesino, tiene la

ISSN: 2992-8338

misma estructura y por ende se espera que sea fácil su adopción. Esta característica es muy importante en la estrategia, pero, además de esto, se espera acompañamiento para buscar la adopción por parte de los usuarios, de manera similar a como fue realizado por (Gómez, Orellana, & Salinas, 2019) en donde se trabajó con pequeños productores bovinos y se hizo gamificación para buscar la adopción.

En cuanto a la facilidad de implementación, además de usar la tecnología DataSnap y los servicios REST, también aporta el hecho de contar con los cuatro componentes para la integran en las Apps (para agregar imágenes, hacer el registro por voz y pasar un texto a voz cuando el usuario lo decide, por no alcanzar a leer o si es muy larga la lectura.

Los campesinos han usado las Apps y han sugerido ajustes como por ejemplo la integración de los componentes de texto a voz y viceversa o la opción de poder ajustar el tamaño de la letra o la configuración del panel para el registro de la información.

La integración que hay entre las herramientas desarrolladas favoreció la construcción por facilitar la representación, ya que pasar del código de una App a otra era sencillo por tener una estructura similar y por la uniformidad en la forma de uso; un resumen del aporte en cada elemento del sistema es:

1. En el aplicativo Web, el MDD ayudó a tener muy pronto el prototipo inicial del aplicativo y con delimitar el alcance y la comunicación entre los autores y los beneficiarios.
2. DataSnap dio estructura a la arquitectura de software, aumentó la reutilización de código, facilitó la implementación de las operaciones de acceso a datos en el servidor REST,
3. La variedad de componentes ayudó a que la implementación fuera más eficiente ya que Rad Studio está diseñado para el desarrollo rápido de aplicaciones, característica en la que aportaron los elementos usados para el servidor web y para la generación de gráficas y de informes en las *Apps.*

Se espera pasar de la disponibilidad de las herramientas a la adopción por parte de los campesinos con los respectivos ajustes que se requieran incorporando la estrategia gamificada que les muestre los beneficios.

REFERENCIAS

Cíceri. M. (2019). *Introducción a Laravel: Aplicaciones robustas ya gran escala*. RedUsers, Google Books .

Embarcadero RAD Studio Overview. (2018). *Embarcadero Technologies*. Recuperado de https://cutt.ly/zwU8IWXk

Embarcadero Technologies. (2018). *Servidores DataSnap REST*. Youtube. Recuperado de https://you.tube/Cu2RtROasF0

Embarcadero Technologies. (2022). *REST Debugger*. Recuperado de https://cutt.ly/SwU8IxAe

Fielding, R. (2000). *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*. University of California, Irvine.

Gómez, U., Orellana, M. y Salinas, J. (2019). Strategy for the appropriation of a DSS in small bovine producers using simulation and a serious video game. *Information* 11(12), 566.

Guo, D., Zhang, Y. (2012). *Research on Software Architecture Base on Data Snap Technology*. In Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice: Volume 2 (pp. 459-464). Springer Berlin Heidelberg.

Jacobson, I.; Booch, G. and Rumbaugh, J. (2000) *El Proceso unificado de desarrollo de software (RUP)*, Madrid, España: Pearson.

Lazurchak, L., Vdovychyn, T. and Zhydyk, V. (2020). The use of the RAD Studio integrated environment in the future teachers training, *Physical and Mathematical Education*, 2(24), 80-86.

Machado, I., Costa, C. and Santos, M. (2022). Data mesh: concepts and principles of a paradigm shift in data architectures. Procedia Computer Science, 196, 263-271.

Pressman, R. (2014). Ingeniería del Software, México: Mc Graw Hill, Séptima edición.

Ražinskas, M. and Čeponienė, L. (2022). MDA approach for Laravel framework code generation from UML diagrams. In CEUR workshop proceedings: IVUS 2020: Information society and university studies 2020: proceedings of the information society and university studies 2020, Kaunas, Lithuania, April 23, 2020 (Vol. 2698, pp. 106-113)

Sferruzza, D., Rocheteau, J., Attiogbé, C. and Lanoix, A. (2018). *A model-driven method for fast building consistent web services from OpenAPI-compatible models*. In International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development (pp. 9-33). Cham: Springer International Publishing.

Simpson, M., Tuck, N. and Bellamy, S. (2004). Small business success factors: the role of education and training. *Education+ Training*, 46(8/9), 481-491.

Tambotoh, J., Manuputty, A. and Banunaek, F. (2015). Socio-economics factors and information technology adoption in rural area. *Procedia Computer Science*,72, 178-185

ISSN: 2992-8338

Analysis of the advantages and difficulties in the implementation of hydroponic systems

Lizbeth Vidal Cortez * **Carlos M. Astorga Zaragoza** *
Juan Reyes Reyes *

* *Tecnológico Nacional de México, CENIDET, Interna Internado Palmira s/n, C.P. 62490 Cuernavaca, Mor., México (e-mail: {m23ce039, carlos.az, juan.rr}@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract:
This article details six methods for the implementation of hydroponic systems, which are sustainable cultivation techniques that dispense with soil, opting instead for nutrient solutions or inert substrates. These techniques guarantee the absorption of all essential nutrients by the plant through an aqueous solution. Various modalities of hydroponic techniques are explored, each with its own advantages in terms of control and resource efficiency. However, the technical challenges and initial investment associated with their implementation are also addressed. This soilless growing approach is gaining significant ground in contemporary food production.

Keywords: Hydroponics, horticulture, monitoring, process control variables, soilless cultivation.

1. INTRODUCCIÓN

La hidroponía es una técnica de cultivo que prescinde del suelo como medio de producción y en su lugar utiliza soluciones nutritivas para proporcionar a las plantas los nutrientes esenciales que necesitan para crecer y prosperar. Esta técnica ha ganado popularidad en la agricultura sostenible debido a sus múltiples ventajas, como un mejor control del ambiente de crecimiento de las plantas, un uso más eficiente del agua y la posibilidad de crecer en espacios o en zonas de mala calidad del suelo (Longar Blanco et al., 2013).

Además, la hidroponía permite un control preciso de los nutrientes que reciben las plantas, asegurando un suministro adecuado para un crecimiento saludable. Esto conduce a un uso más eficiente de los recursos, ya que las plantas toman solo lo que necesitan, reduciendo el desperdicio de agua y nutrientes en comparación con la agricultura convencional (Barbado, 2005).

En los sistemas hidropónicos, exploraremos los fundamentos de esta técnica de cultivo, sus tipos más comunes, los beneficios que ofrece y algunas consideraciones clave para implementar con éxito un sistema hidropónico. Desde la antigüedad hasta la actualidad, la hidroponía ha evolucionado y se ha adaptado a las necesidades de la agricultura sostenible y su crecimiento continuo, promete desempeñar un papel crucial en la producción de alimentos en el futuro (Sánchez, 1982).

La velocidad de crecimiento en los sistemas hidropónicos también tienden a ser más rápidos, lo que significa que los ciclos de cultivo son más cortos y con una mayor producción en el mismo período de tiempo, al ser sistemas cerrados, se pueden implementar en una variedad de entornos, desde áreas urbanas hasta regiones con suelos poco fértiles, aprovechando el espacio de manera más efectiva y permitiendo la agricultura en lugares donde sería difícil o imposible de otra manera (Ani and Gopalakirishnan, 2020).

Se utilizan diferentes métodos y tecnologías para controlar la temperatura, la humedad, la iluminación y la ventilación, creando un entorno favorable para el desarrollo de las plantas. Esto permite cultivar una amplia variedad de cultivos durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas externas (López Elías, 2018).

A lo largo de este artículo, se presenta el funcionamiento de la hidroponía, sus aplicaciones en la agricultura y la horticultura, y en los diferentes sistemas hidropónicos disponibles, proporcionaremos una visión general de los factores clave que deben considerarse al embarcarse en un proyecto hidropónico, ofreciendo una alternativa innovadora y eficiente a la agricultura sostenible. Principalmente, al prescindir del suelo, eliminanando muchos de los problemas asociados con enfermedades del suelo y plagas, lo que facilita el control y la prevención de problemas de cultivo.

ISSN: 2992-8338

2. SISTEMAS HIDROPÓNICOS

Los sistemas hidropónicos ofrecen una solución sostenible, eficiente y adaptable para el cultivo de alimentos, abordando varios desafíos asociados con la agricultura convencional.

2.1 Sistema de NFT (Película de Nutrientes)

El autor (Helmy et al., 2020) hace un estudio que se enfoca en establecer un sistema hidropónico utilizando la técnica de película de nutrientes para cultivar lechuga en el Altiplano central de Bolivia, donde la agricultura tradicional tiene un ingreso económico alto y limitado. Se destaca la viabilidad de implementar carpas solares para fomentar la producción de hortalizas y la introducción de sistemas hidropónicos. Otro estudio en (Jaimes Terceros and Blanco Villacorta, 2019) muestra los resultados y discusiones que incluyen el análisis fisicoquímico de la automatización del sistema NFT por sus siglas en inglés (*Nutrient Film Technique*) con un temporizador digital , la importancia del pH en la disponibilidad de nutrientes y la influencia de la térmica en la floración prematura de la lechuga. Se abordan aspectos como el consumo de agua, el caudal, la eficiencia de la red de riego y el rendimiento hídrico.

En (Manqueros-Avilés, 2015) se centra en estudiar el sistema hidropónico NFT como un metodo efectivo para el cultivo de hortalizas, especialmente en el contexto del campo mexicano. Aborda el problema de la escasez de recursos y los problemas que enfrentan los agricultores tradicionales, con el objetivo de contribuir al conocimiento del comportamiento de factores en el sistema NFT mediante el uso de sensores de iones selectivos y LabVIEW. El estudio de este caso se centra en la interacción humana y en cómo la tecnología tiene un impacto particular el lenguaje, influyendo y mejorando esta interacción.

El autor (Hernández and Hernández, 2005) detalla los materiales y los métodos utilizados, incluido el sistema de película de nutrientes, el lecho de semillas, los nutrientes, los parámetros de cultivo y el proceso de cultivo teniendo como resultados las muestras en aumento significativo en la producción de lechuga en comparación con los métodos de suelo convencional y con un consumo de agua significativamente menor.

En (Brenes-Peralta and Jiménez-Morales, 2014) el autor estudia la implementación del sistema en el invernadero, utilizando tubos de PVC, soluciones nutritivas y protocolos específicos para la siembra, control y cosecha. Se lleva a cabo un seguimiento diario del sistema, que incluye factores de seguimiento como la humedad relativa, la temperatura, la concentración de CO2, la conductividad y el pH de la solución nutritiva.

2.2 Sistema de Raíz Flotante

El autor (Albuja et al., 2021) destaca el cultivo de lechuga hidropónica en invernadero describiendo la infraestructura y el método de cultivo, con el análisis económico de la lechuga hidropónica en clima semiárido, destacando las preocupaciones sobre el suministro de alimentos debido al aumento de la población y de las tierras agrícolas. En (Pertierra Lazo and Quispe Gonzabay, 2020) los resultados que presenta sobre el rendimiento y el consumo de recursos como agua y solución nutritiva, mencionando la técnica hidropónica que presenta como una alternativa para la productividad agrícola, destacando sus ventajas en términos de agua y la posibilidad de cultivo en zonas urbanas. También menciona los desafíos como la alta inversión inicial y la proliferación de enfermedades de las raíces.

El estudio de la producción de lechuga hidropónica se centra en la evaluación y la acumulación de NO_3, considerando diferentes proporciones de nitrato y amonio en el nutriente durante el transcurso de dos temporadas de crecimiento: verano y otoño. Se utilizaron semillas de lechuga de la variedad Montemar, cultivadas en sistema radicular flotante sin sustrato (Lara-Izaguirre et al., 2019).

En (Armoa et al., 2018) se hace un estudio centrándose en la producción de lechuga, comparando la siembra de semillas de lechuga en tres tratamientos: dos sistemas hidropónicos y un sistema de campo. Los resultados muestran diferencias significativas entre los tratamientos, destacando la eficiencia de la producción hidropónica al permitir una cosecha más temprana y obtener plantas de gran altura y diámetro en comparación con el cultivo. Sin embargo, el sistema convencional también presenta ventajas en cuanto a masa fresca y número de hojas.

2.3 Sistema de Acuapónico

El autor (Muñoz Gutiérrez, 2012) habla sobre los sistemas acuapónicos de recirculación, que combinan la acuicultura e hidroponía para una producción de alimentos más sostenibles. Incluso si la acuicultura se ha desarrollado rápidamente, generando la competencia por recursos naturales y un impacto ambiental reutilizando el agua y los nutrientes, apoyando la producción sostenible de los alimentos. También describe los elementos esenciales del sistema como clarificadores, biofiltros y componentes hidropónicos. Analizando las ventajas como la reducción de residuos y costes operativos, pero también desventajas como la necesidad de más espacio para el cultivo de plantas. Resalta el potencial de desarrollo de Colombia y la importancia de las inversiones e investigaciones para mejorar la viabilidad de los sistemas acuapónicos, particularmente para los pequeños productores acuícolas.

ISSN: 2992-8338

2.4 Sistema de Recirculación

En (Castillo et al., 2014) se estudia la producción hidropónica de tomates con y sin recirculación de la solución nutritiva. Destacando el importante incremento en la producción de hortalizas de invernadero en México, particularmente tomate, aunque surgen problemas como la acumulación de patógenos y sales en el suelo. Centrándose en mantener una solución nutritiva para el crecimiento de las plantas, enfatizando la importancia de la conductividad eléctrica y la proporción correcta de de nutrientes. El estudio compara los sistemas hidropónicos abiertos y cerrados, destacando los beneficios ambientales de los sistemas cerrados en términos de ahorro de agua para fertilizantes, reduciendo así el impacto en las masas de agua.

2.5 Sistema de cultivo en Sustrato

La evaluación de sustratos en el cultivo de lechuga bajo sistema hidropónico en el municipio de en Colombia se presenta en (Guerrero et al., 2014). La hidroponía ofrece ventajas como control de factores externos, mayor precocidad en el producto y mayor productividad. La horticultura en la región es crucial, buscando modernizarla para mejorar la calidad y cantidad de los cultivos. El estudio se centra en la evaluación de dos sustratos, coco y cáscara de arroz, de diferentes maneras para el cultivo de lechuga. Destacando la importancia de implementar prácticas agrícolas sostenibles y de tecnología como la hidroponía.

El autor (Ortega Martinez et al., 2017) se centra en la eficiencia de diferentes sustratos en el cultivo de tomate en invernadero, tanto en sistemas hidropónicos como en suelo. En México ha aumentado la producción de hortalizas en condiciones protegidas, particularmente de tomate. Los sustratos utilizados varían dependiendo de variables climáticas agronómicas. Aunque el 80% de la producción se realiza en el suelo, se considera como inerte y se aplican inorgánicos, lo que incrementa los costos y el medio ambiente.

2.6 Sistema de Mecha o (Pabilo)

En (Medrano-García et al., 2019) se realizó un estudio en un invernadero a 3 metros sobre el nivel del mar, evaluando el cultivo de lechuga en ciclos con diferentes soluciones y sustratos hidropónicos, utilizando riego por mecha. El cultivo por mecha capilar se presenta como una opción combinada con solución hidropónica y sistemas de riego. Esta técnica busca optimizar el uso del agua, especialmente en regiones semiáridas. Los resultados muestran que la solución hidropónica de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ofrecen mejores rendimientos agronómicos en comparación con otras opciones. El riego por mecha reduce la evaporación y la transpiración, parece ser una tecnología de consumo económica y eficaz. Además, este método permite ahorrar mano de obra y energía al requerir una sola aplicación de agua y nutrientes.

3. VENTAJAS Y DIFICULTADES

El proceso de producción implica una cuidadosa selección de lavado y desinfección, pregerminación, siembra, germinación, riego, aplicación de una solución nutritiva, cosecha y rendimiento. Entre los factores que influyen en la calidad de la semilla, la iluminación, la temperatura, la humedad y el agua.

3.1 Ventajas

Los sistemas hidropónicos ofrecen ventajas significativas, como ahorros de agua, menores costos de producción en comparación con métodos convencionales, eficiencia espacial y ciclos de producción mejorados (Castañares, 2020). Un ejemplo destacado es el sistema NFT, que garantiza un suministro constante de nutrientes para un crecimiento rápido y eficiente. Su simplicidad y fácil acceso a las raíces son notables. Por otro lado, los sistemas de recirculación, al reutilizar agua y nutrientes, son más sostenibles y permiten un control preciso ajustando la mezcla según las necesidades específicas de las plantas.

3.2 Dificultades

Los sistemas hidropónicos también enfrentan desafíos, como la necesidad de capacitación limitada, costos iniciales de instalación y posibles limitaciones de materiales (Juarez-Lopez-Porfirio et al., 2013). Los sistemas acuapónicos, en particular, pueden ser costosos de mantener y requieren un equilibrio delicado entre peces, plantas y microorganismos en el agua, lo que implica una inversión considerable en acuarios y equipos adicionales. Además, los sistemas de sustrato pueden resultar laboriosos, ya que necesitan monitoreo regular y ajuste de los niveles de nutrientes, con el riesgo de albergar enfermedades o insectos si no se controlan adecuadamente. A pesar de sus ventajas, tanto el sistema NFT como los sistemas de sustrato presentan desafíos que requieren atención cuidadosa.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se realizó una revisión del estado del arte de los sistemas hidropónicos basándose en los diferentes tipos de sistemas que ofrecen ventajas como un mayor control sobre los nutrientes y el agua, un uso más eficiente del espacio y la posibilidad de cultivar en áreas donde el suelo es de mala calidad o limitado. El problema principal es la pérdida del uso más eficiente de recursos como agua y tener un control de los nutrientes precisos sobre el entorno del crecimiento de las plantas. Una de las soluciones encontradas es la automatización en estos sistemas que implican el uso de tecnología y dispositivos para controlar

ISSN: 2992-8338

y regular varios aspectos del entorno de cultivo de manera eficiente.

Se propone la incorporación de la automatización a través de tecnología y dispositivos especializados. Visualizando un futuro de innovación y sostenible donde sensores inteligentes y algoritmos avanzados puedan regular todos los aspectos del entorno del cultivo de manera eficiente. Además, se sugiere una exploración detallada sobre cómo hacer que estos sistemas fueran más sostenibles, considerando prácticas como el reciclaje del agua y la integración de fuentes de energía renovable.

REFERENCES

Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., and Rodriguez, M. (2021). Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Minerva*, 2(4), 45–54.

Ani, A. and Gopalakirishnan, P. (2020). Automated hydroponic drip irrigation using big data. In *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 370–375. IEEE.

Armoa, M.M.S., Casuriaga, O.L.C., and Ocampo, F.D.V. (2018). Producción de lechuga (lactuca sativa), hidropónica y convencional, en el distrito de concepción, departamento de concepción. *El Surco*, 26.

Barbado, J.L. (2005). Hidroponía. *Su empresa en cultivos en agua. Editorial Albatros SACI. 1a (Ed.). Buenos Aires.*

Brenes-Peralta, L. and Jiménez-Morales, M.F. (2014). Experiencia de producción de lechuga americana (lactuca sativa) hidropónica, tipo NFT. *Rev. Tecnol. Marcha*, 27, 56.

Castañares, J.L. (2020). El abc de la hidroponía. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Informe técnico.*

Castillo, S.D., Moreno-Pérez, E.d.C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J.M., Rodríguez-Pérez, J.E., Osuna-Encino, T., et al. (2014). Producción hidropónica de jitomate (solatium lycopersicum l.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48(2), 185–197.

Guerrero, E.M., Revelo, J.C., Benavides, O., Chaves, G., and Moncayo, C.Á. (2014). Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(1), 3–16.

Helmy, H., Janah, D.A.M., Nursyahid, A., Mara, M.N., Setyawan, T.A., and Nugroho, A.S. (2020). Nutrient solution acidity control system on nft-based hydroponic plants using multiple linear regression method. In *2020 7th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 272–276. IEEE.

Hernández, C.J. and Hernández, J.L. (2005). Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y desarrollo*, 3(1), 11–16.

Jaimes Terceros, M. and Blanco Villacorta, W. (2019). Establecimiento de un sistema hidropónico con la técnica de película nutritiva (NFT) en el cultivo de lechuga (lactuca sativa l.) en la estación experimental patacamaya, la paz. *Apthapi*, 5, 1608.

Juarez-Lopez-Porfirio, Morales-Rodriguez, H.J., Sandoval-Villa, M., Gomez-Danes, A.A., Cruz-Crespo, E., Juareaz-Rosete, C.R., Aguirre-Ortega, J., Alejo-Santiago, G., Caton, O., et al. (2013). Producción de forraje verde hidropónico. *CONACYT*.

Lara-Izaguirre, A.Y., Rojas-Velázquez, A.N., Romero-Méndez, M.J., Ramírez-Tobías, H.M., Cruz-Crespo, E., Alcalá-Jáuregui, J.A., and Loredo-Ostí, C. (2019). Crecimiento y acumulación de NO_3 en lechuga hidropónica con relaciones nitrato/amonio en dos estaciones de cultivo. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(1), 21–29.

Longar Blanco, M.d.P., Pérez Hernández, M.d.P.M., and Ríos Martínez, E. (2013). El estado de técnica de la hidroponía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(5), 803–809.

López Elías, J. (2018). La producción hidropónica de cultivos. *Idesia (Arica)*, 36(2), 139–141.

Manqueros-Avilés, V. (2015). Mediciones nutritivas en un sistema hidropónico nft mediante el uso de sensores de iones selectivos y labview. In *1er Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniera*, 1–8.

Medrano-García, P., Chipana-Rivera, R., Moreno-Pérez, M.F., and Roldán-Cañas, J. (2019). Riego capilar por mecha en el cultivo de lechuga (lactuca sativa l.) en sistema combinado de solución hidropónica y suelo, como alternativa en la agricultura urbana de bolivia. *Ing. Agua*, 23(1), 53.

Muñoz Gutiérrez, M.E. (2012). Sistemas de recirculación acuapónicos. *Inf. téc.*, 76, 123.

Ortega Martinez, L.D., Martinez Valenzuela, C., Ocampo Mendoza, J., Sandoval Castro, E., and Perez Armendariz, B. (2017). Eficiencia de sustratos en el sistema hidroponico y de suelo para la produccion de tomate en invernadero. *Rev. Mex. De Cienc. Agric.*, 7(3), 643–653.

Pertierra Lazo, R. and Quispe Gonzabay, J. (2020). Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido. *Granja*, 31(1), 118–130.

Sánchez, G. (1982). Cultivo hidropónico. *Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería*, 01–50.

ISSN: 2992-8338

Pilot plant design for biofertilizers production ⋆

Flores-Montiel M. [*,**], **Secundino-Tlapala A.** [*], **Eguía-Rivas J.L.** [*], **Granados-Castellanos M.B.**[*]

[*] *Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Cuautla, Yecapixtla 62826, México*
[**] *Tecnológico Nacional de México-CENIDET, Cuernavaca 62490, México*

Abstract
In the present work, the design of a pilot plant for biofertilizers production is presented. The main objective is the construction and automation at a rural community in the state of Morelos, Mexico. The design takes into account the requirements outlined in the manuals of the Ministry of Agriculture, through the federal program: «Producción para el Bienestar (PpB)», and its Technical Accompaniment Strategy (EAT). This, as a formula to reach food self-sufficiency through agroecological transition for Mexico.

Keywords: Bio-fertilizers, organic compost, food self-sufficiency, sustainable agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

A principios del año 2022 se presentó una grave escasez de fertilizantes químicos, derivado de las sanciones occidentales y restricciones a Rusia, de esta manera amenazando el éxito de cultivos a nivel mundial debido al incremento en el precio de más del 78 %. Los agricultores de muchas regiones, sobre todo de regiones marginadas y de pobreza, no se permitieron la adquisición de fertilizantes, o incluso si se encontraban dispuestos a pagar el elevado costo, éstos no se encontraban disponibles. Bourne (2022).

El Gobierno de México, como un esfuerzo para evitar la crisis alimentaria del país, ha diseñado 30 proyectos y programas denominados prioritarios, con la finalidad de apoyar a los más necesitados y lograr la reactivación de la economía nacional. Entre esos proyectos se encuentran: la Producción para el Bienestar y Fertilizantes para el bienestar en el SADER (2016) y por el Gobierno de México (2023b).

Producción para el Bienestar es un programa de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), que beneficia a pequeños y medianos productores de cultivos como el maíz, frijol, trigo, arroz, café y caña de azúcar. Al mismo tiempo, orientado para lograr la autosuficiencia alimentaria bajo el enfoque de agricultura sustentable; de esta manera los campesinos reciben apoyo económico que les ayuda a invertir en: actividades productivas, capacitación, asistencia técnica, fertilizantes, renta de tractores y semillas. El programa respalda a productores de caña de azúcar, que abastecen a ingenios ubicados en estados como: Campeche, Chiapas, Michoacán, Morelos, entre otros de México (2023a).

⋆ Agradecemos al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto clave 18845 23-P.

Las Escuelas de Campo capacitan y promueven el aprendizaje mediante el proceso de "aprender haciendo", con el objetivo de brindar conocimiento teórico y práctico a los ejidatarios y comuneros, para la preparación de diferentes compostas, biofertilizantes y bioinsecticidas. Usando para su preparación, ingredientes de bajo costo y disponibles en su entorno, como lo son hojarasca, desechos de hormigas, guano, estiércol de ganado, entre otros. De esta manera, logrando evitar el consumo de fertilizantes químicos y proporcionar los macro y micronutrientes necesarios para sus cultivos; así como la recuperación del suelo.(Rizvi et al. (2022); Allouzi et al. (2022)).

El proceso de preparación de los biofertilizantes requiere de parámetros ideales en las condiciones de humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica (C.E.) y del Potencial de Oxidación y Reducción (O.R.P.), cuyas mediciones; así como la constante agitación de la mezcla, se realiza de forma manual. Los agricultores se organizan en equipos de trabajo para supervisar el proceso, el cual tiene una duración aproximada de entre 15 a 30 días (dependiendo el tipo de ingrediente), para obtener el producto en forma de una solución nutritiva, la cual es pasteurizada, envasada y finalmente repartida entre los integrantes de la Escuela del Campo de esa comunidad.

La investigación presentada en este artículo se centra en el diseño de una planta piloto, cuya construcción permitirá a los agricultores, la disminución del trabajo físico para mantener la agitación de la mezcla, mediante la transferencia de tecnología con la automatización del proceso de obtención de biofertilizantes.

2. ELABORACIÓN DE BIOINSUMOS

Los bioinsumos son productos que se obtienen a partir del procesamiento de materia vegetal y del aislamiento y multiplicación de microorganismos. Se utilizan con fines de

ISSN: 2992-8338

fertilización y nutrición de las plantas y suelos y con ellos se logra una mejora en la calidad de los suelos, se favorece la absorción de nutrientes en plantas y suelos, se controlan las enfermedades de las plantas, se regulan las poblaciones de plagas y se estimula la resistencia y productividad de las plantas. Todo ello deriva en una mejora de la productividad agrícola, en el respeto al medio ambiente y en alimentos saludables para las familias productoras y para la población en su conjunto, ver de México (2022).

El Gobierno de México, en la página de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, se encuentra, un conjunto de manuales didácticos para la elaboración de bioinsumos, en los que difunde y refuerza prácticas agroecológicas para el mejoramiento de la productividad y a su vez promueve sistemas locales de producción y consumo de alimentos sanos, nutritivos, resilientes, competitivos y socialmente responsables. Entre los manuales se encuentran, por ejemplo: la inoculación de semillas, composta, humus de lombriz, solución nutritiva de lombriz, entre otros.

2.1 Composta

La composta es un abono resultado de un proceso de biodegradación de materia orgánica llevado a cabo por múltiples organismos y microorganismos descomponedores que comen, trituran y degradan las moléculas de ésta bajo condiciones aerobias. Para elaborar este abono, es necesario apilar por capas, diversas formas de materia orgánica: residuos secos (pajas o restos de cosechas), estiércol, residuos verdes y residuos de vegetales frescos, tierra de monte o composta terminada y materia mineral (ceniza de madera, harina de roca, cascarones de huevo). Provee los tres elementos esenciales para el desarrollo de las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio, además de otros elementos y algunos minerales que son indispensables para la fertilidad del suelo. En la elaboración de una composta debemos tomar en cuenta la temperatura, humedad, oxigenación y la relación Carbono: Nitrógeno (C:N). El carbono y el nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica. Carbono: presente en los materiales secos (hojarascas, rastrojos, pajas, restos de jardinería secos, fibras de coco, viruta, cartón y papel picados). Nitrógeno: presente en mayor cantidad cuando los materiales orgánicos son verdes al igual que cuando los excrementos son frescos. El valor recomendado de la relación C:N para obtener composta de calidad se encuentra estimado entre 25:1 y 40:1. Lo que quiere decir que se añadirán al proceso de compostaje 25 o 40 partes de carbono por 1 parte de nitrógeno. Esta relación de componentes debe ser tomada en cuenta para obtener un abono de calidad de acuerdo a Hamelers (2001).

En la Fig. 1 se muestra el proceso de elaboración de una composta. En la parte izquierda se encuentra la materia prima, como lo es: agua, rastrojo, estiércol, etc. En la parte central, los procesos a realizar, como: el volteo, métodos de preparación, la recirculación y el tiempo de espera para su descomposición y; finalmente se obtiene como producto, una composta de 1.5m ancho x 10m largo x 1m de altura.

2.2 Humus de lombriz

El humus de lombriz, es uno de los mejores abonos orgánicos y se genera mediante la ecotecnología de vermicompostaje con algunas especies de lombrices de tierra. Los excrementos de las lombrices generan la vermicomposta, la cual al humificarse se estabiliza y se nombra humus de lombriz, mismo que tiene un grado de descomposición tan elevado que la materia no sufre grandes transformaciones con el paso del tiempo. La lombriz que se utiliza comúnmente es la roja californiana (*Eisenia fetida*) una excelente recuperadora orgánica, además no sufre de ningún tipo de enfermedad.(ver Bedell et al. (2023); Holzinger et al. (2023)).

Figura 1. Diagrama del proceso de elaboración de una composta.

La lombriz roja californiana tiene otras características como:

- Puede vivir hasta los 16 años.
- Pesa menos de 1 gramo y puede alcanzar un tamaño de 6 a 10 cm.
- Tiene 5 corazones, 6 pares de riñones y 182 conductos excretores.
- Respira por la piel.
- Se alimenta de todo tipo de desechos orgánicos.
- Expulsa el 60 % de la materia orgánica después de su digestión.
- La tierra que pasa por la lombriz tiene 5 veces más nitrógeno, 7 veces más potasio, el doble de calcio y de magnesio.
- Puede vivir en poblaciones de hasta 50,000 individuos por m^2.
- Es hermafrodita insuficiente.
- Madura sexualmente entre el segundo y tercer mes de vida.
- Se aparea y deposita cada 7 a 14 días una cápsula (*cocoon*) conteniendo de 2 a 20 huevos que a su vez eclosionan pasados los 21 días. Así una lombriz adulta es capaz de tener 1,500 crías en un año.

El humus de lombriz es rico en nutrientes; por su contenido de flora microbiana, es fácil de asimilar por las plantas ya que tiene ácidos fúlvicos, estimula el enraizamiento, se utiliza comúnmente como mejorador de suelos o sustituto de fertilizantes, tiene la capacidad de absorber metales pesados como plomo y arsénico, y además su pH cercano a la neutralidad lo hace favorable para cultivo de plantas delicadas.

En la Fig. 2 se muestra el diagrama del proceso de elaboración de humus de lombriz. En la parte izquierda se encuentra la materia prima, como lo es: agua, material seco, estiércol, lombriz, etc. En la parte central, los procesos a realizar, como: el volteo, métodos de preparación, la recirculación y el tiempo de espera para su descomposición

ISSN: 2992-8338

Figura 2. Diagrama del proceso de elaboración de humus de lombriz.

y; finalmente se obtiene como producto, una composta de 1.5m ancho x 10m largo x 1m de altura.

2.3 Solución nutritiva de lombriz

La solución nutritiva de lombriz es un biofertilizante natural que contiene macroelementos como el nitrógeno, fósforo, y potasio, así como microelementos (zinc, fierro, cobre, manganeso, molibdeno, boro, calcio, magnesio, azufre y sodio), nutrientes indispensables para el crecimiento de las plantas, además de contener algunas enzimas, proteínas, aminoácidos y microorganismos benéficos, siendo este un biofertilizante ideal para su aplicación en todos los cultivos, ya sea por medio del riego o por aspersión a la filósfera, ver Hujuri et al. (2023). La riqueza de este insumo está dada por el trabajo que realizan las lombrices rojas californianas (eisenia fetida) mismas que a partir del proceso de ingestión y digestión provocan la transformación biológica, química y física de los materiales orgánicos sólidos contenidos en el montículo de lombricomposta, ver Kavehei et al. (2018). Algunos ejemplos del potencial de biodegradación y uso de lixiviado de lombriz, se pueden ver en Sizmur & Richardson (2020); Singh & Sinha (2022); Zeb et al. (2020a).

La solución nutritiva, obtenida en el proceso de lombricompostaje es un líquido de excelente calidad para mejorar, corregir y aumentar la fertilidad en suelos agrícolas debido a su alto contenido de humatos los cuales son ácidos húmicos y fúlvicos altamente asimilables y aprovechables por las raíces de los cultivos y la microflora y microfauna de los suelos y sustratos de siembra agrícola. Los pasos a seguir para la elaboración de la composta se ilustran en la Fig. 3.
Al ser aplicado al suelo o al follaje de la planta actúa como:

- Fertilizante o abono orgánico ya que hace aprovechable todo el amplio rango de los macros y micronutrientes.
- Evita la concentración y acumulación de sales en el suelo.
- Promueve un medio ambiente ideal para la proliferación de microorganismos benéficos tales como: bacterias, hongos, actinomicetos, protozoarios, etc.
- Limita el desarrollo de patógenos y enfermedades, con lo cual se reduce sensiblemente el riesgo durante el desarrollo fenológico de las plantas.
- Estimula la humificación propia del suelo y su enriquecimiento en microflora y microfauna.
- Es un aportante natural de materia orgánica asimilable por los cultivos.

Figura 3. Diagrama del proceso de elaboración de la solución nutritiva de lombriz.

- Propicia la descomposición de residuos orgánicos (vegetales principalmente) presentes en el suelo.

En la Fig. 3 se muestra el diagrama del proceso de elaboración de una solución nutritiva de lombriz. En la parte izquierda se encuentra la materia prima, como lo es: agua, estiércol, lombriz roja, etc. En la parte central, los procesos a realizar, como: el volteo, métodos de preparación, la recirculación y el tiempo de espera para su descomposición y; finalmente se obtiene como producto, una composta de 1.5m ancho x 10m largo x 1m de altura. Para la solución nutritiva, ya sea, la que se obtuvo mediante la composta o por humus de lombriz; ambas se les aplica el proceso térmico de pasteurización, llevándolas a una temperatura de 70°C constantes durante 50 min., esto con la finalidad de evitar la proliferación de microorganismos nocivos para el cultivo. Después, la solución nutritiva, se envasa en las presentaciones deseadas para su empleo o comercialización.

De acuerdo a los manuales de la página oficial del Gobierno de México (2022). La solución nutritiva se deberá diluir en agua; la dosis de dilusión es 1L de solución nutritiva por cada 4L de agua; y se puede aplicar a todo tipo de cultivo (granos, frutales, forrajes, jardines, hortalizas,etc.). Las dosis pueden variar dependiendo de la condición nutricional y del desarrollo vegetativo del cultivo; lo máximo que se sugiere aplicar durante todo el desarrollo del cultivo son: 1000 litros por hectárea. El método de aplicación es por bomba manual o motorizada, puede ser aplicada al tallo o de forma foliar.

3. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO

Para el diseño de la planta piloto se consideraron los requerimientos necesarios de los procesos para la elaboración de compostas, humus de lombriz y para la solución nutritiva de lombriz. Los requerimientos para los tres procesos son los siguientes:

- Preparación del piso en el terreno. Se elige el área que permita emparejar y apisonar el suelo, que tenga una pendiente que fluctué entre 2 y 4 %.
- Se deberán contar con unos bordes pequeños a lo largo y a ambos lados de la zona central; esto, para formar un canal que sirva como barrera para evitar la pérdida de la solución nutritiva.
- Protección del área.
- Área de recepción de la solución nutritiva y para su retorno.
- Fosa de captación de la solución nutritiva.

ISSN: 2992-8338

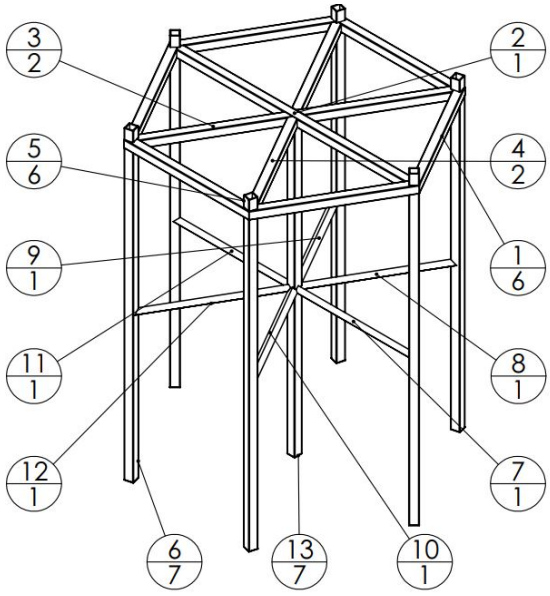


Figura 4. Diseño de la base del tinaco de agua limpia.

N.º	DESCRIPCIÓN	#PIEZAS	ÁNGULO1	ÁNGULO2	LONGITUD(cm)
1	PTR 1 1/2" X 1 1/2", Cal. 14	6	30°	30°	63.51
2	PTR 1 1/2" X 1 1/2", Cal. 14	1	-	-	118.22
3	PTR 1 1/2" X 1 1/2", Cal. 14	2	30°	-	58.01
4	PTR 1 1/2" X 1 1/2", Cal. 14	2	-	-	56.91
5	PTR 1 1/2" X 1 1/2", Cal. 14	6	0°	0°	5
6	PTR 1 1/2" X 1 1/2", Cal. 14	7	0°	0°	146
7	ÁNGULO 90° 1" X 1" X 1/8"	1	-	-	58.01
8	ÁNGULO 90° 1" X 1" X 1/8"	1	-	-	59.22
9	ÁNGULO 90° 1" X 1" X 1/8"	1	-	-	58.27
10	ÁNGULO 90° 1" X 1" X 1/8"	1	-	-	58.96
11	ÁNGULO 90° 1" X 1" X 1/8"	1	0°	-	58.01
12	ÁNGULO 90° 1" X 1" X 1/8"	1	-	-	58.27
13	SOLERA 1 1/2" X 1/8"	7			

Figura 5. Materiales de la base del tinaco de agua limpia correspondientes a la Fig. 4.

- Tubería para aireación.

En las Figs. 4 y 5, se encuentra la lista de los materiales necesarios para la construcción de la base del tinaco de agua limpia. En la Fig. 6 se muestra una vista isométrica en 3D, de la base y el tinaco de agua limpia; así como su interconexión con la pileta de compostaje. El software utilizado para la realización de la propuesta de la planta piloto es Solidworks.

En las Figs. 7 y 8, se muestran las vistas lateral y posterior de la pileta de compostaje; así como, dimensiones y características necesarias para su construcción.

Los sensores propuestos son dos: un termómetro tipo aguja de 40cm de largo y un sensor de O.R.P., pH y C.E. Éstos sensores son los básicos, para el caso de toma de mediciones para monitoreo y control del proceso de producción de bioinsumos. En la Fig. 9 se muestra la colocación del sensor de temperatura en la pileta de compostaje. Mientras que, en la Fig. 10 se muestra la colocación del sensor de O.R.P., pH y C.E. en el tanque de recepción y la bomba periférica, que realiza la recirculación de la solución nutritiva líquida.

En la Fig. 11 se muestra la vista completa de la planta piloto, con sus principales partes: pileta de compostaje, base de tinaco de agua limpia, tinaco de almacenamiento

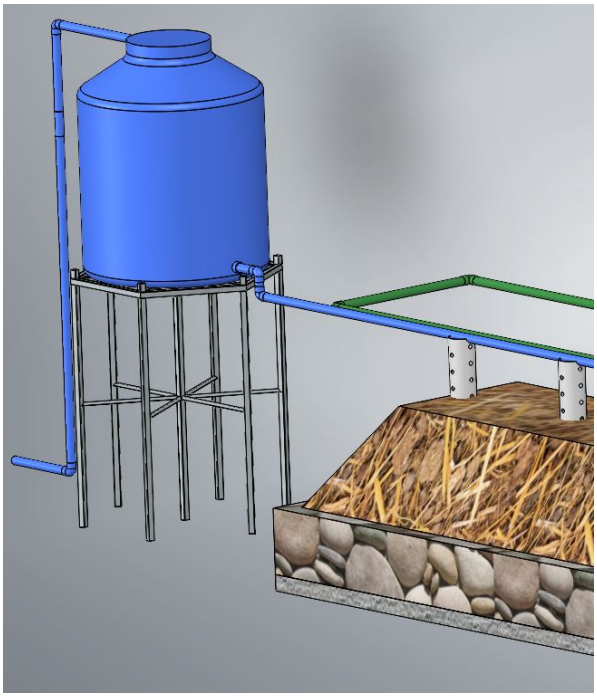


Figura 6. Base del tinaco de agua limpia.

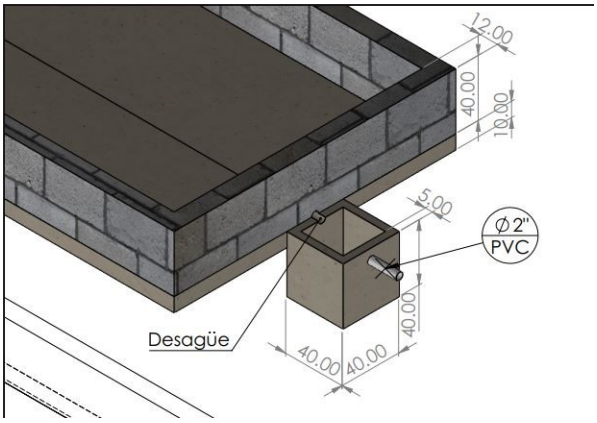


Figura 7. Desagüe vista lateral.

de líquidos, equipo de bombeo para recirculación, distribución del equipo de aireación, tubería y sensores. En el Cuadro 1 se encuentra la lista detallada de los materiales para realizar la construcción de la planta piloto, para la recuperación de 1 hectárea de suelo.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una propuesta para la construcción de una planta piloto para la obtención de bioinsumos, basada en los requerimientos de los procesos para la elaboración de compostas, humus de lombriz y de soluciones nutritivas de lombriz, de acuerdo a los manuales de la página oficial del Gobierno de México (2022). Con la finalidad de automatizar el proceso de producción, ya que son los que ocupan un mayor área para su construcción, requiriendo una mayor cantidad de tiempo y trabajo manual.

ISSN: 2992-8338

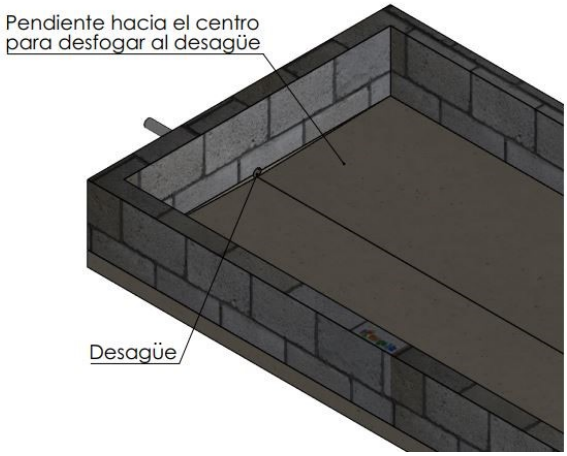


Figura 8. Desagüe vista posterior.

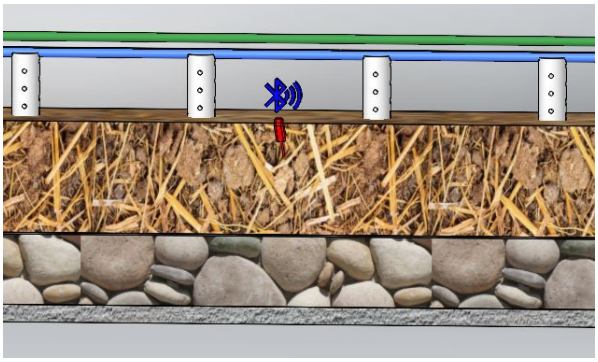


Figura 9. Colocación de los sensores y aireación.

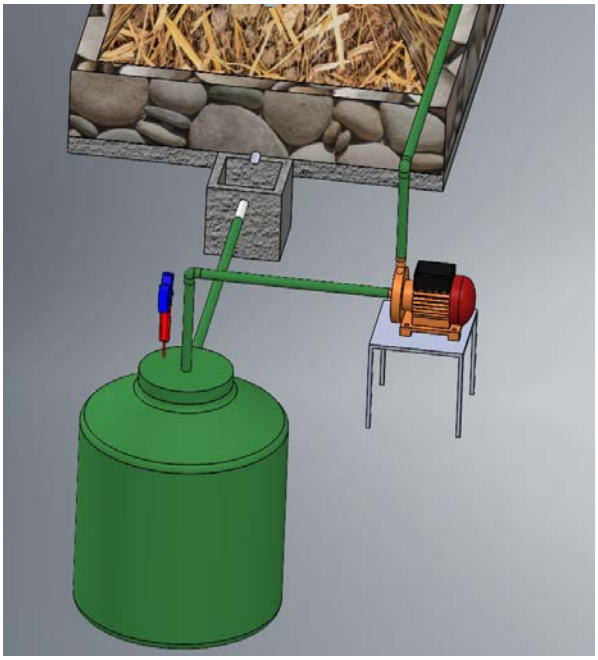


Figura 10. Recepción de la solución nutritiva y su recirculación.

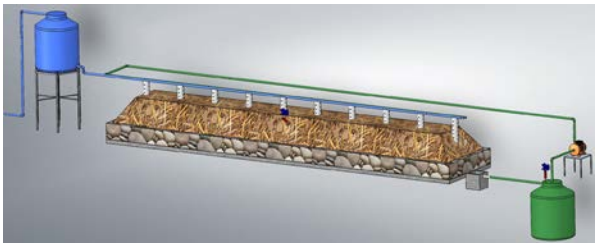


Figura 11. Vista completa del diseño de la planta piloto.

Partes de la planta piloto	Cantidad de material	Descripción del material
Base de tinaco de 1.55m x 1.10m de diámetro	18m	PTR de 1 1/2"x 1 1/2", calibre 14.
	1L	Pintura anticorrosiva
	4m	Ángulo 90°, 1"x 1"x 1/8"
	1m	Solera de 1 1/2"x 1/8"
Pileta de compostaje de 10m x 2m	700kg	Cemento
	130	Block
	$2m^3$	Arena
	$2m^3$	Grava
	11m	Malla para piso
	150kg	Mortero
Almacenamiento de liquidos	2 piezas	Tinacos de 1100 litros
Equipo de bombeo	1 pieza	Bomba periférica autocebante de 1HP a 127 V, 60 Hz
Equipo de aireación	10 piezas	Tubo PVC de 4"de 1.35m, con perforaciones de 1"de diámetro separadas 10 cm a lo largo del tubo cada 90°
Tubería	50m	Tubo PVC de 2"
	8 piezas	Codos de 90° de PVC
	1 pieza	Tee de 90° de PVC
	1 pieza	Pegamento para PVC
Sensores	1 pieza	Termómetro tipo aguja de 40 cm
	1 pieza	Sensor de O.R.P., pH. y C.E.

Cuadro 1. Lista de materiales para la construcción de la planta piloto.

Esta planta piloto, representa la producción necesaria para la recuperación de suelos para una hectárea de terreno; para extensiones más grandes, se sugiere interconectar varías piletas de compostaje, para que, de esta manera incremente su producción. El proceso de elaboración de bioinsumos, puede ser escalado por los productores agrícolas y ser una forma de sustento para sus familias, y si lo desean, comercializar las soluciones nutritivas obtenidas.

El objetivo principal de esta planta piloto y del proceso de bioinsumos, es lograr una transición agroecológica, reduciendo el consumo de fertilizantes químicos que degradan

ISSN: 2992-8338

el suelo; al mismo tiempo, presentado un ahorro al productor, al ya no adquirir insumos químicos.

Las ventajas de utilizar bioinsumos, es que reducen al productor los costos de adquisición de agroquímicos y se obtienen productos totalmente orgánicos. Logrando de ésta manera, una transición, de una producción agroindustrial agresiva con el medio ambiente a una bioorgánica mas amigable y benéfica para la salud; ya que no emplea químicos. Esto, abre la posibilidad de certificar sus productos, lo cual incrementa su valor comercial ayudando a la economía de sus familias, con capacidad de exportacion internacional.

Los productos de la planta piloto, sumados a la caracterización del terreno, permitirán conocer, las dosis exactas para regular: los minerales, nutrientes y microorganismos a niveles óptimos, para la producción de productos orgánicos de buena calidad; ya que en los estudios de años recientes, demuestran un incremento de la infertilidad del suelo, por el uso excesivo de químicos, Zeb et al. (2020b).

Por el momento, la implementación de la planta piloto se encuentra en: la fase de conexiones de tuberías, bomba de recirculación, aireación, colocación de sensores y toma de agua limpia. Se plantea a futuro en este investigación, la toma de mediciones de las variables del proceso de producción de biofertilizantes de manera inalámbrica por medio de una aplicación para adquirir, almacenar y analizar los datos obtenidos.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto clave 18845 23-P.
Al Ing. Juan Carlos Flores Montiel, productor cañero, por sus aportaciones y experiencia, que ayudaron a enriquecer este proyecto.

REFERENCIAS

Allouzi, M.M.A., Allouzi, S.M.A., Keng, Z.X., Supramaniam, C.V., Singh, A., & Chong, S. (2022). Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. *Heliyon*, 8(12). doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12609.

Bedell, J.P., Roques, O., & Bayard, R. (2023). From the importance of organic carbon in reproduction tests with eisenia fetida. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 104. doi: https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104297.

Bourne, J. (2022). La crisis alimentaria mundial se agrava con el tambaleo del suministro de fertilizantes. URL `https://www.nationalgeographic.es/`.

de México, G. (2022). Bioinsumos transición agroecológica. URL `https://www.gob.mx/agricultura/documentos/`.

de México, G. (2023a). Producción para el bienestar. URL `https://www.gob.mx/produccionparaelbienestar`.

de México, G. (2023b). Proyectos y programas prioritarios. URL `www.gob.mx/proyectosyprogramasprioritarios`.

Hamelers, H. (2001). A mathematical model for composting kinetics. *Wageningen Universiteit. Promotor: Rulkens,W.H. prof.dr.ir., co-promotor(en): Straten, G. van prof.dr.ir.. - Wageningen : [s.n.], 2001. - ISBN 90-5808-445-0.*

Holzinger, A., Hink, L., Sehl, E., Rüppel, N., Lehndorff, E., Weig, A.R., Agarwal, S., Horn, M.A., & Feldhaar, H. (2023). Biodegradable polymers boost reproduction in the earthworm eisenia fetida. *Science of The Total Environment*, 892. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164670.

Hujuri, U., Sankar Paul, K., Kurmi, B., Borah, A., & Nongdhar, F.A. (2023). Microbial composting and vermicomposting of temple waste using eisenia fetida. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2780–2784. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.177. Advances in Chemical Engineering and Science (ACES 2022).

Kavehei, A., Hose, G.C., & Gore, D.B. (2018). Effects of red earthworms (eisenia fetida) on leachability of lead minerals in soil. *Environmental Pollution*, 237, 851–857. doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.021.

Rizvi, A., Ahmed, B., Umar, S., & Khan, M.S. (2022). 21 - bacterial biofertilizers for bioremediation: A priority for future research. In R. Soni, D.C. Suyal, A.N. Yadav, & R. Goel (eds.), *Trends of Applied Microbiology for Sustainable Economy*, Developments in Applied Microbiology and Biotechnology, 565–612. Academic Press. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91595-3.00011-2.

SADER (2016). Escuelas de campo, un modelo de transferencia de tecnología para pequeños productores: Inifap. URL `https://www.gob.mx/agricultura`.

Singh, S. & Sinha, R.K. (2022). 7 - vermicomposting of organic wastes by earthworms: Making wealth from waste by converting 'garbage into gold' for farmers. In C. Hussain & S. Hait (eds.), *Advanced Organic Waste Management*, 93–120. Elsevier. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00004-6.

Sizmur, T. & Richardson, J. (2020). Earthworms accelerate the biogeochemical cycling of potentially toxic elements: Results of a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 148. doi: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107865.

Zeb, A., Li, S., Wu, J., Lian, J., Liu, W., & Sun, Y. (2020a). Insights into the mechanisms underlying the remediation potential of earthworms in contaminated soil: A critical review of research progress and prospects. *Science of The Total Environment*, 740. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140145.

Zeb, A., Li, S., Wu, J., Lian, J., Liu, W., & Sun, Y. (2020b). Insights into the mechanisms underlying the remediation potential of earthworms in contaminated soil: A critical review of research progress and prospects. *Science of The Total Environment*, 740. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140145.

ISSN: 2992-8338

Current Situation of the Grape Agroindustry in the State of Querétaro

G.M. Morales-Reséndiz, C. Morales-Morales, M.S. Guerrero-Ramírez, J. Navarrete-Damián, M. Castro-Bello*

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, 76800 San Juan del Río, Querétaro

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruiz Massieu, No. 5, Fracc. Villa Moderna, C.P. 39090, Chilpancingo, Guerrero

m23590619@sjuanrio.tecn.mx.

Abstract Viticulture is currently an important activity among the various regions of the country, mainly in the Bajío region, where businesses dedicated to the sale and production of wine have grown due to the accelerated growth of urban and industrial areas and tourist attractions. This situation demands new proposals for business models that allow the wine agroindustry to be competitive and represent greater economic benefits, which is why this work presents a review of the current state of the wine agroindustry in the region, its production, value chain, and a business model proposal is made with a focus on sustainability.

Keyboards: Agroindustry, vitiviniculture, grape, business model.

1. INTRODUCCIÓN

En México, la vitivinicultura es la más antigua de América, adoptando las primeras vides españolas que desarrollaron los primeros plantíos del nuevo mundo por el año de 1520 (Nava, 2023). Se comenzaron a sembrar vides por el año de 1522, donde se generó por primera vez la producción de vino dentro del territorio. Posteriormente, los cultivos se expandieron, llegando a la región, donde por primera vez se cosecharon los plantíos en el valle de San Juan del Rio. Al paso del tiempo, empresarios extranjeros observaron que dentro del territorio era posible formar alianzas comerciales para la distribución, compra y venta de vino, por lo que se exportaron más cepas de uva a nuestro país. La producción de vino a partir de este momento, comenzó a diversificarse, por lo que, debido a las excelentes relaciones e influencias del país con comunidades extranjeras, comienza la implementación de casas productoras de vino, iniciando en 1958, Cavas San Juan, productores de los Vinos Hidalgo en San Juan del Río, marca actualmente propiedad de *La Madrileña*. A partir de ahí, da el surgimiento del vino en el Estado de Querétaro, sus zonas cada vez más populares y casas de vino provenientes de diferentes estados y países extranjeros, han apostado por la región para el surgimiento del producto en el país. Actualmente Freixenet ha dado también un impulso de renovación a la zona vinícola de la región. Es la zona donde las variedades de uva de ciclo corto obtienen un alto contenido en azucares en detrimento de la acidez. Querétaro cuenta con un privilegiado clima que da a la vid un toque especial en esta región del país (Martínez, 2023).

2. PROBLEMÁTICA

El escaso trabajo disponible referente a la situación actual de la agroindustria vitivinícola, no permite conocer los sistemas de producción y de comercialización para investigaciones futuras que den propuestas alternativas a estas empresas.

El estado de Querétaro tiene la región vinícola al sur del hemisferio norte, lo que se traduce como vitivinicultura extrema, riesgo de granizo, lluvias que producen descensos de temperatura por la noche, altura 1950 msnm y tipo de suelo. El cambio climático es un factor potente que pone en peligro las zonas vinicultoras, principalmente escasez del agua que origina modificación de la calidad del vino, por regar los plantíos con agua de otros lugares. La variedad de climas fomenta condiciones adecuadas para el surgimiento de plagas, sumado el uso de productos que afectan al ambiente (Montenegro, 2020).

La región del Bajío presenta diversos problemas ambientales que afecta a las zonas vitivinícolas, destacando las enfermedades y plagas, incendios forestales, insolación, tormentas fuertes y granizo, perjudicando la planta de uva. Esta problemática en la región representa tema de investigación para proponer mecanismos que permitan reducir estas amenazas ecológicas, sea a través de la optimización del riego, capacitación de personal de bodega hasta el área técnica en el campo, áreas administrativas y de atención al cliente. Esto permitirá dar un valor agregado al proceso de producción de la uva, considerando fruto de uva de baja calidad o muy maduro para producir productos alternos, que permitirá a las empresas locales implementar nuevas líneas de productos (Lazo, 2014).

ISSN: 2992-8338

En los productos derivados de la uva, las empresas implementan etiquetados ecológicos como instrumento de mercadeo para preservar un modelo de negocio sustentable basada en una economía circular y de sostenibilidad, a través del reciclado, reutilización y dando valor agregado (Contreras, 2019).

Por lo tanto, el objetivo del trabajo es presentar la situación actual de la agroindustria de la uva en la región del Estado de Querétaro, considerando el ecosistema del modelo de economía circular que apoya a las empresas de la región, desglosado la identificación de las empresas vitivinícolas, proceso de producción del vino y sus derivados del sistema de producción de la uva.

3. MOTIVACIÓN

Dada la relevancia económica de la agroindustria de la uva en el Estado de Querétaro, es importante conocer el funcionamiento de sus procesos productivos y su comercialización en la región. La uva es un fruto rico en nutrientes, principal insumo para la elaboración del vino y es utilizada en la elaboración de diversos productos como jugos, mezcales, bebidas, alimentos para animales, fertilizante para plantas y muchos otros productos, todo esto en función del grado de madurez de la uva, la cual está compuesta de fenólico, pectina, carbohidratos, ácidos grasos, orgánicos y colorantes.

Actualmente, el aumento del consumo de vino en la región del Bajío ha causado que acrecienten nuevos productores de vino, distribuidos su crecimiento de manera desmedido, demandando una mayor cantidad de volúmenes de uva, provocando que generen mayor cantidad de residuos orgánicos, destacando el orujo de uva, semillas, lías, palillos, aguas negras, entre otros que impactan negativamente al medio ambiente. El proceso de producción del vino tradicional es como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo de un proceso de vinificación (Chantaca, 2021).

4. PROPUESTA

La contribución de este trabajo consiste en presentar la situación actual del proceso de producción de vino e identificar sus derivados, la cual permitirá plantear una propuesta de Modelo de negocio que favorezca la inserción de la economía circular en la industria vitivinícola en la región de Querétaro para lograr la sostenibilidad.

La región de vinos se extiende por 11 municipios del estado de Querétaro, por lo que componen la zona ecoturística, las cuales aprovechan sus temporadas de vendimias de las cavas en los meses de junio y septiembre que atraen miles de personas cada año, por lo que causa grandes cantidades de desperdicio de uva, perdida del producto terminado, falta de eficiencia operacional, aumentos en costos de producción y contaminación cruzada, la cual es un tema que debe ser analizado desde su proceso de valor, producción y distribución, estructura organizacional (áreas operativas y administrativas), y distribución de planta. Lo anterior, permite proponer la mejoría de un modelo de negocio que integre la capacidad de aumentar el control y organización de los inventarios y sistematización del flujo de productos (Rodea, 2023).

La propuesta teórica que reporta este trabajo es un modelo de negocio que integra a empresas vitivinícolas de la región para integrar nuevos productos, derivados de los residuos orgánicos generados en el proceso de la producción de vino, la cual es considerada complejo, debido a la poca sistematización y costumbres de los productores de usar residuos principales ocupados durante la vinificación (orujo, lías, semillas, palillos). Por lo que, esta propuesta teórica consiste en redirigir los residuos orgánicos derivados de la uva y producción del vino, en la elaboración de compostaje orgánica como parte de la cadena de suministro de las materias primas (Mata, 2020), logrando de esta forma incrementar la cadena de valor en la industria vinícola. Además, en la logística que va desde el proveedor hasta el cliente considerar tipo de suelo, almacenamiento, transporte y exportación que permita a la empresa contar con grandes ventajas competitivas. A continuación, se reporta en un diagrama a bloques la propuesta teórica del proceso de producción de la uva integrada en un modelo de negocio mejorado:

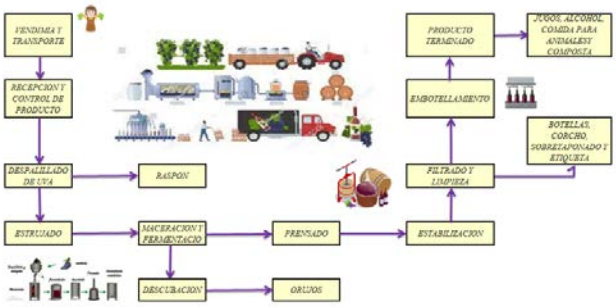


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de la Uva.

ISSN: 2992-8338

5. ALCANCES

El análisis de la situación actual de las empresas de la agroindustria de la uva, está delimitada al Estado de Querétaro, principalmente en los municipios de San Juan del Río, Ezequiel Montes, Colón, El Márquez y Tequisquiapan, que son ricos en cultivos de vitis vinífera y producción de primera calidad. En un comienzo, estos municipios presentaban en la calidad del vino como baja, debido al desconocimiento de procesos eficientes de producción, hasta que se formalizo su producción a través del establecimiento de zonas vitivinicultoras, posicionándose como uno de los productores de vino importantes en el país y América Latina, todo esto favorecida por las condiciones climáticas y tipo de suelo para producir un vino de calidad internacional (Elorza, 2022).

6. CONCLUSIONES

El aumento de la competencia en la agroindustria de la vitivinicultura obliga a los productores crear nuevos mercados y generar mayor producción de productos derivados de la vid con alta calidad, con diferenciador y autenticidad, atrayendo mercados de consumidores cautivos bajo la premisa de agricultura sustentable y sostenible. En el estado de Querétaro se localizan los valles más prolíferos del país que contribuyen al crecimiento de la producción de vino nacional (Martínez, 2023).

En los trabajos futuros queda validar la propuesta teórica de un modelo de negocio mejorado en un sistema de producción de vino y cultivo de la uva en una empresa tradicional de la región del estado de Querétaro.

7. BIBLIOGRAFIA

Chantaca, D. A. (2021). La Industria Vinícola Como Fuente De Valiosos Residuos Agroindustriales. Cienciacierta, pp. 123-145.

Contreras, D. D. (2019). Turismo Enologico Y Rutas Del Vino En México. Estado Del Conocimiento Y Analisis De Casos. Rivar, pp. 27-44.

Elorza, A. V. (2022). La Industria Vitivinicola Mexicana En El Siglo Xxi: Retos Economicos, Ambientales Y Sociales. Conacyt, pp. 13-590.

Lazo, M. M. (2014). Social Media En El Sector Del Enoturismo. Revista De Comunicación De La Seeci., pp. 34-49.

Marikyan, D. (2022). Blockchain: A Business Model Innovation Analysis. Digital Business, pp. 1-13.

Martínez, A. S. (2023). Implantacion Y Desarrollo Del Sector Vinicola En Mexico. Journal Of Tourism And Heritage Research, pp. 117-132.

Mata, I. M. (2020). Modelo De Negocio De Las Empresas Agroturisticas De La Ruta Del Queso, Queretaro. Turydes Revista Turismo Y Desarrollo Local, pp. 1-16.

Montenegro, P. G. (2020). Manual De Campo Acciones Para Una Vitivinicultura Sustentable E Inocua. Chile: pp. 152.

Nava, R. T. (2023). Vino Del Bajio: Una Ruta En Expansión. Triangulo Industrial Bajio, pp. 1-16.

Rodea, L. F. (2023). Influencia Del Enoturismo En El Consumo Y La Producción De Vinos En Querétaro. Encrucijadas, pp. 1-24.

SOBERANÍA EN SALUD

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Design and Development of a 5-DoF Wheelchair-Mounted Robotic Arm

Luis E. Navarrete Zarco*, Andrés Blanco Ortega*, Jorge Colín Ocampo*, Arturo Abúndez Pliego*, José A. Santana Camilo, Moisés Román Sedeño***, Andrea Magadán Salazar***

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490*
(Tel: 777-362-7770; e-mail: m22ce072@cenidet.tecnm.mx, andres.bo@cenidet.tecnm.mx, jorge.co@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx, andrea.ms@cenidet.tecncm.mx).

*** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos, México, C.P. 62780*
(Tel: 734-343-2110; e-mail: jasantanac@hotmail.com)

**** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla, Morelos, México, C.P. 62745*
(Tel: 735-122-2242; e-mail: moises.roman@cuautla.tecnm.mx)

Abstract: Assistive technology for people with disabilities is still far from reaching the population that requires it due to its high cost. For example, robotic arms that are mounted on wheelchairs to assist patients with cerebral palsy in basic activities of daily living that cost over $12,000. This article presents the design of a robotic arm, which can adapt to wheelchairs and be an assistant in basic activities, with 5 degrees of freedom, considering the opening and closing of the gripper as one degree of freedom. Simulation results of the virtual prototype are presented, in the MSC Adams environment, with the implementation of Proportional-Derivative type controllers with the tracking of smooth trajectories. The controller showed good performance in taking the effector from a start point to an end point. Having a maximum error of 0.001° in the response of the angular positions.

Keywords: Assistive robot, spastic cerebral palsy, basic activities of daily living.

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud al 2020, más de 1,000 millones de personas viven en todo el mundo con algún tipo de discapacidad, aproximadamente el 15 % de la población mundial; de ellas, casi 190 millones de personas tienen dificultades en su funcionamiento motriz y requieren con frecuencia servicios de asistencia. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, en México hay 6,179,890 personas con algún tipo de discapacidad, lo que representa 4.9 % de la población total del país. El INEGI identifica a las personas con discapacidad como aquellas que tienen dificultad para llevar a cabo actividades consideradas básicas, como: ver, escuchar, caminar, recordar o concentrarse, realizar su cuidado personal y comunicarse, ver Figura1, (INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020).

Con el incremento del envejecimiento de la sociedad y de personas con discapacidades, también, se tiene un aumento en la demanda de sillas de ruedas con brazos robóticos. Esto también conlleva a que más investigadores y equipos de la industria intenten resolver algunos de los problemas y optimizar las sillas de ruedas existentes que puedan llegar a la población que lo requiera.

Por otra parte, la parálisis cerebral espástica es una enfermedad que provoca rigidez en los músculos, produciendo dificultad en el movimiento de las regiones deterioradas del cuerpo, provocando dependencia y daño psicológico. La parálisis cerebral es un grupo de trastornos que causan problemas del movimiento, el equilibrio y la postura. Afecta la corteza motora del cerebro, la parte de este órgano que dirige el movimiento muscular. Asimismo, la principal causa de discapacidad son los problemas de movilidad, y se reporta que un alto porcentaje de pacientes con esta enfermedad tienen dificultades para realizar sus Actividades Básicas de la Vida Diaria (ABVD) (Rozas et al., 2020).

Figura 1. Porcentaje de la población con discapacidad según dificultad en la actividad 2020 (INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020).

Muchas ABVD, como tomar un vaso, sostener un tenedor, encender una lámpara o abrir una puerta, que la mayoría de las personas realizan sin pensar, pueden volverse insuperables para las personas que tienen discapacidades en las extremidades superiores. La mecatrónica puede proporcionar un mejor enfoque para el desarrollo de dispositivos de asistencia, al permitir una mayor funcionalidad, como lo son los brazos robóticos de asistencia. Se han propuesto una gran cantidad de brazos robóticos, desde 3 GDL (Sawaqed et al., 2017), 4 GDL (Alqasemi et al., 2005), 5 GDL (Cristancho et al. 2020), 6 GDL (Rulik et al., 2022) (Ehrlich et al., 2022) (Sunny et al., 2021) (Karuppiah et al., 2018) y 7 GDL (Maheu et al., 2011).

ISSN: 2992-8338

Para el control de brazos robóticos se han utilizado diversos dispositivos para permitir al usuario aumentar su capacidad de interacción con el entorno doméstico, tales como: Joystick (Rulik et al., 2022) (Rozas et al., 2020) (Maheu et al., 2011) (Alqasemi et al., 2005), teclado (Alqasemi et al., 2005), sistema de control de robot de asistencia con seguimiento ocular con botones virtuales (Sunny et al., 2021), sistema de reconocimiento de voz con vocabulario limitado (Glory et al., 2021), interfaz de control para la detección de movimiento de la lengua (Pálsdóttir et al., 2019), sistemas de interfaz cerebro-computadora (BCI) no invasivos (Achic et al., 2016). Los brazos robóticos para sillas de ruedas auxiliares en ABVD resultan ser de alto costo, entre 12,000 y 50,000 USD aproximadamente (Robitzski, 2019).

Por lo tanto, en este artículo se propone el diseño de un sistema mecatrónico, que consta de un brazo robótico de 5 grados de libertad (GDL), considerando la apertura y cierre de la pinza como un grado de libertad, que se pueda implementar en sillas de ruedas eléctricas para cubrir la discapacidad física causada por la parálisis cerebral. Como una etapa inicial del diseño, se presenta el prototipo virtual y el análisis cinemático que se valida en el software MSC Adams, al implementar controladores tipo PD con seguimiento de trayectorias.

2. BRAZO ROBÓTICO DE 5 GDL

2.1 Descripción del sistema

El brazo robótico propuesto se muestra en la Figura 2. Está compuesto por 4 eslabones: base, brazo, antebrazo, muñeca y mano (herramienta de agarre). Los GDL son: movimiento prismático (q_1), movimientos de revolución (q_2, q_3, q_4) y la apertura y cierre del efector final (q_5).

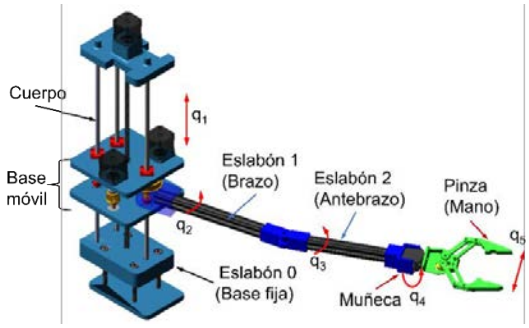


Figura 2. Brazo robótico de 5 GDL.

Los componentes del brazo robótico se muestran en la Figura 3. Una ventaja de este brazo es que cuenta con un tornillo tipo ACME en el eje vertical; eje de la dirección de la carga y de la gravedad. Este tornillo por la fuerza de fricción que presenta ayuda a sostener la carga, lo que coadyuvará a un ahorro de energía. Como una primera versión del prototipo se construirá con perfil modular de aluminio (perfil Bosch) y componentes impresos de material PLA, para validar el funcionamiento del brazo robótico. También, se utilizan componentes estándar (rodamientos lineales, poleas, tuercas, tornillos, etc.) para reducir el costo del brazo. Se presenta el análisis cinemático y se valida, con un prototipo virtual, mediante simulación en MSC Adams.

2.2 Cinemática

Para determinar la cinemática directa del brazo robótico se utiliza el algoritmo de Denavit Hartenberg. Se utiliza la configuración de los sistemas de coordenadas mostrados en la Figura 4, para determinar los parámetros de Denavit Hartenberg, ver Tabla 1. No se considera el GDL de cierre/apertura de la pinza.

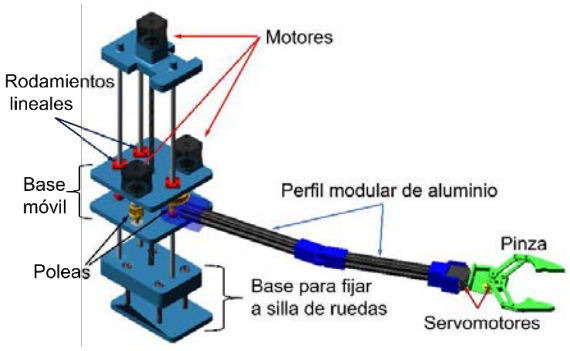


Figura 3. Componentes del brazo robótico.

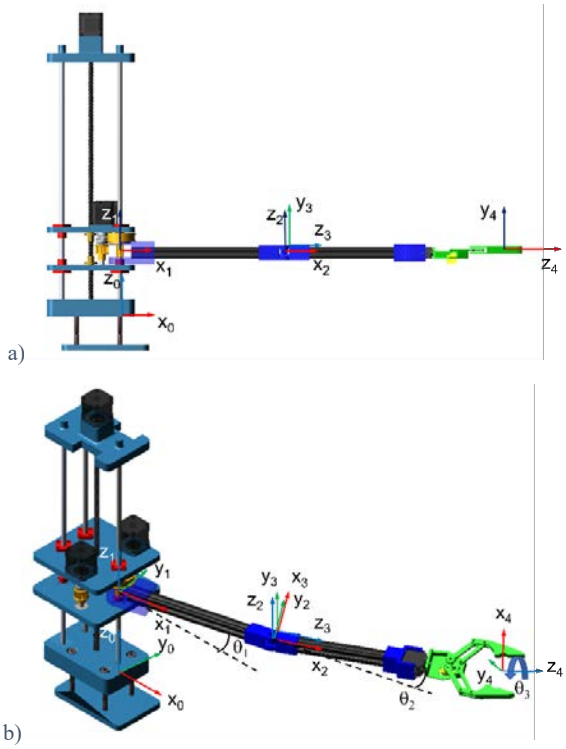


Figura 4. Sistemas de coordenadas: a) vista frontal, b) vista isométrica.

Tabla 1. Parámetros de Denavit Hartenberg.

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	0	z_1	0
2	0	l_1	0	θ_1
3	$\pi/2$	0	0	$\theta_2+\frac{\pi}{2}$
4	0	0	$l_2 + l_3$	θ_3

Finalmente, la matriz de localización del efector final con respecto a la base se obtiene al multiplicar las matrices:

ISSN: 2992-8338

$$T_4^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3$$

$$T_4^0 = \begin{pmatrix} C_{\theta_3}C_{(\theta_1+\theta_2)} & -S_{\theta_3}C_{(\theta_1+\theta_2)} & S_{(\theta_1+\theta_2)} & l_1C_{\theta_1}+(l_2+l_3)S_{(\theta_1+\theta_2)} \\ C_{\theta_3}S_{(\theta_1+\theta_2)} & -S_{\theta_3}S_{(\theta_1+\theta_2)} & -C_{(\theta_1+\theta_2)} & l_1S_{\theta_1}-(l_2+l_3)C_{(\theta_1+\theta_2)} \\ S_{\theta_3} & C_{\theta_3} & 0 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

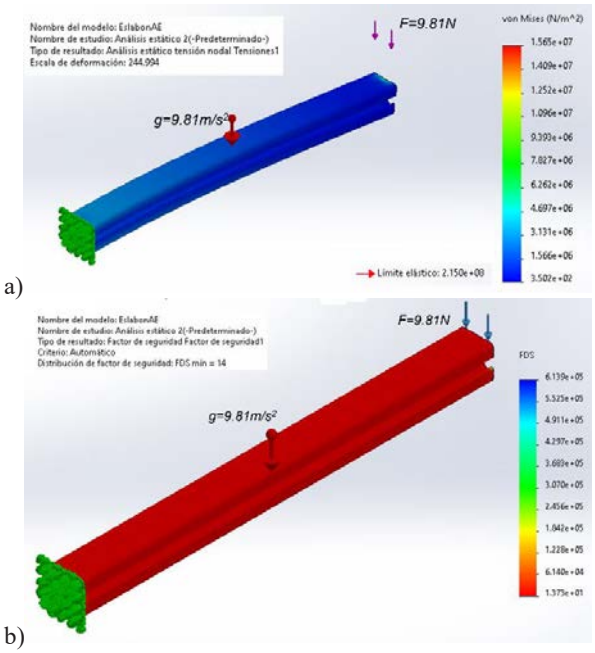
Donde:

$$S_{\theta_1} = \sin\theta_1, S_{\theta_3} = \sin\theta_3, C_{\theta_3} = \cos\theta_3$$

$$C_{(\theta_1+\theta_2)} = \cos\left(\theta_1+\theta_2+\frac{\pi}{2}\right), S_{(\theta_1+\theta_2)} = \sin\left(\theta_1+\theta_2+\frac{\pi}{2}\right)$$

2.3 Análisis de esfuerzos

En el diseño de la estructura de brazos robóticos, para sillas de ruedas, se han utilizado cargas entre 500 g y 1.5 kg (Rozas et al., 2020) (Ktistakis & Bourbakis, 2005) (Rulik et al., 2022). En este caso, se considera una carga de 1 kg como se muestra en la Figura 5. Se realizó un análisis de esfuerzos solo a un eslabón de perfil modular de aluminio (6063-T6), donde el Factor de Seguridad (FS) resultó de 14. Posteriormente, se realizó la prueba de esfuerzos - deformaciones a todo el ensamble del brazo (componentes de aluminio) y resultó con un FS de 7.3, ver Figura 6. Como se puede observar de los resultados, el uso de perfil modular es una buena opción para la construcción de este tipo de brazos robóticos, que además coadyuvan a ser un sistema de bajo costo. Siendo uno de los objetivos, reducir el costo del manipulador.



a)

b)

Figura 5. Resultados de simulación: a) esfuerzos de von Misses y b) factor de seguridad de un eslabón de perfil modular de aluminio de *l=30cm*.

3. SISTEMA DE CONTROL

Considere la Figura 7, donde la base móvil (m_e) se desplaza una distancia z hacia arriba, al aplicar una fuerza F_z proporcionada por el motor que se encuentra en la parte superior de la base fija. Los eslabones 1 y 2, tienen momento de inercia J_1 y J_2, respectivamente. El eslabón 1 gira un ángulo θ_1, y el eslabón 2 gira un ángulo θ_2, al aplicarse los torques τ_1 y τ_2, respectivamente. La pinza tiene un momento de inercia J_3 y gira un ángulo θ_3 cuando se aplica el torque τ_3. En estas simulaciones, no se considera el torque que abre y cierra la pinza.

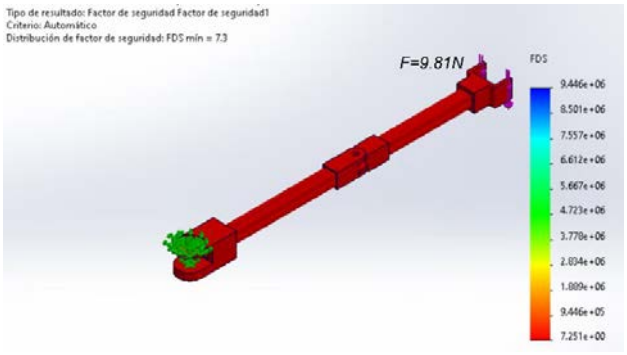


Figura 6. Factor de seguridad del brazo robótico de material de aluminio.

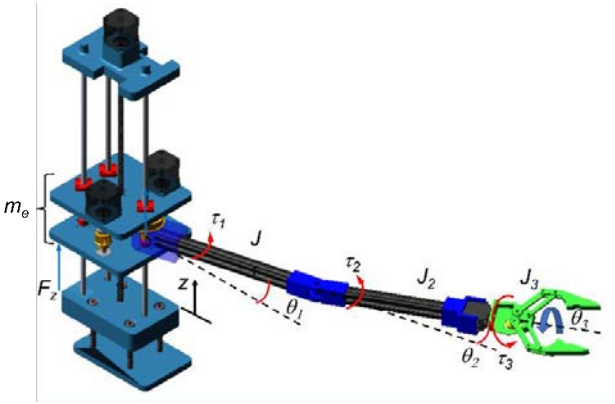


Figura 7. Diagrama esquemático del brazo robótico.

Como una etapa inicial para controlar el brazo robótico, se consideran las uniones activas de manera independiente. Considerando las siguientes variables de estado: $z_1 = z, z_2 = \dot{z}, z_3 = \theta_1, z_4 = \dot{\theta}_1, z_5 = \theta_2, z_6 = \dot{\theta}_2, z_7 = \theta_3, z_8 = \dot{\theta}_3$.

Por lo que se proponen controladores tipo Proporcional Derivativo (PD) para el seguimiento de trayectorias en cada unión activa, como se muestra a continuación:

$$F_z = m_e\left(\ddot{z}_d - k_p(z_1 - z_d) - k_d(z_2 - \dot{z}_d)\right) \quad (2)$$

$$\tau_1 = J_1\left(\ddot{z}_{1d} - k_{p1}(z_3 - z_{1d}) - k_{d1}(z_4 - \dot{z}_{1d})\right) \quad (3)$$

$$\tau_2 = J_2\left(\ddot{z}_{2d} - k_{p2}(z_5 - z_{2d}) - k_{d2}(z_6 - \dot{z}_{2d})\right) \quad (4)$$

$$\tau_3 = J_3\left(\ddot{z}_{3d} - k_{p3}(z_7 - z_{3d}) - k_{d3}(z_8 - \dot{z}_{3d})\right) \quad (5)$$

Las ganancias de los controladores se establecieron por asignación de polos, y están dadas por:

$$k_p = 225, k_d = 25$$

ISSN: 2992-8338

$$k_{p1} = k_{p2} = k_{p3} = 400$$

$$k_{d1} = k_{d2} = k_{d3} = 30$$

Donde se propone que las trayectorias deseadas (z_d, z_{1d}, z_{2d}, z_{3d},) sean un polinomio de tercer grado, como se muestra en (6).

$$\sigma(t) = z_0 + (z_f - z_0)(3\mu^2 - 2\mu^3)$$
$$\mu = \frac{t - t_0}{t_f - t_0}$$
$$z_d(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \sigma(t) & t_0 \le t \le t_f \\ z_f & t > t_f \end{cases} \quad (6)$$

El polinomio para la trayectoria deseada inicia en un punto (t_0,z_0) para ir a un punto final (t_f,z_f) de manera suave.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se realizaron simulaciones con el prototipo virtual, bajo el entorno de MSC Adams View, para validar la cinemática directa y llevar a una posición deseada, con seguimiento de trayectorias, y verificar el desempeño de los controladores propuestos. En las simulaciones se consideraron algunos componentes de material PLA (coples entre eslabones, placas de base móvil, entre otros.), los cuales se pretenden validar su desempeño con un prototipo físico en la siguiente etapa.

Los parámetros de simulación se muestran en la Tabla 2. El objetivo de la simulación que se presenta, es llevar el efector final desde un punto inicial (z_0 = 0.05 m, $z_{30} = z_{50} = z_{70}$ =0) a un punto final (z_f = 0.2 m, $z_3 = z_{5f}$ =12°, z_{7f} =90°).

Tabla 2. Parámetros del brazo robótico.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
m_e	0.988 kg	l_1	0.284 m
J_1	7x10^{-4} kgm^2	l_2	0.2609 m
J_2	4x10^{-4} kgm^2	l_3	0.1089 m
J_3	2x10^{-5} kgm^2		

De acuerdo con la cinemática (1), la matriz de transformación queda como:

$$T_4^0 = \begin{pmatrix} 0 & 0.40674 & 0.91354 & 0.61562 \\ 0 & -0.91354 & 0.40674 & 0.20946 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

En la Figura 8 se muestra el desplazamiento de la base móvil, inicia en la posición z_0 = 0.05 m y en 5 s se va a una posición final de z_f =0.2 m, siguiendo la trayectoria deseada, teniendo un error máximo de 0.0015 m, ver Figura 9. También, se muestra la velocidad y el esfuerzo de control, dando un valor promedio de F_z = 17 N.

En la Figura 10 se muestra el desplazamiento angular del eslabón 1, inicia en la posición z_{30} = 0° y en 5 s se va a una posición final de z_{3f} = 12°. También, se muestra la velocidad angular y el esfuerzo de control τ_1. En la Figura 11 se muestra el error de seguimiento de la trayectoria deseada para z_1.

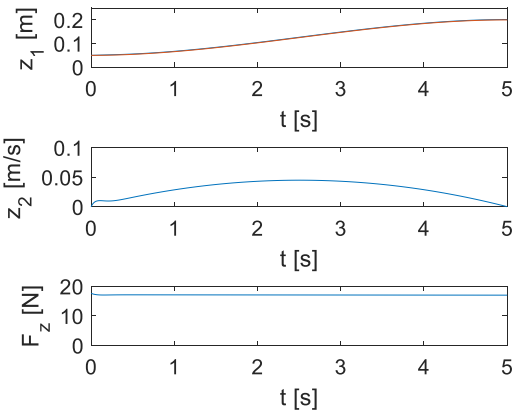


Figura 8. Respuesta de la base móvil.

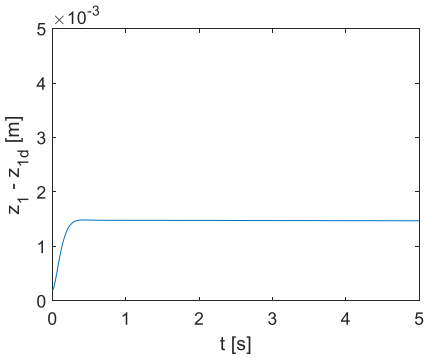


Figura 9. Error de desplazamiento de la base móvil.

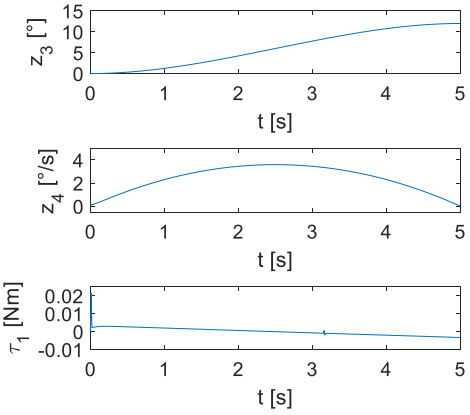


Figura 10. Respuesta del eslabón 1.

ISSN: 2992-8338

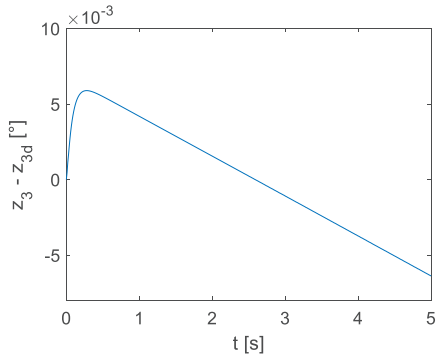


Figura 11. Error angular del eslabón del eslabón 1.

En la Figura 12 se muestra, de manera similar, el desplazamiento angular del eslabón 2, donde inicia en la posición $z_{50} = 0°$ y en 5 s se va a una posición final de $z_{5f} = 12°$. También, se muestra la velocidad angular requerida y el esfuerzo de control τ_2. El esfuerzo de control es menor al del eslabón 1, por la masa e inercia del eslabón 2, que son menores. Mientras que el esfuerzo de control del eslabón 1, carga todo el brazo. En la Figura 13 se muestra el error de seguimiento de la trayectoria deseada para z_5.

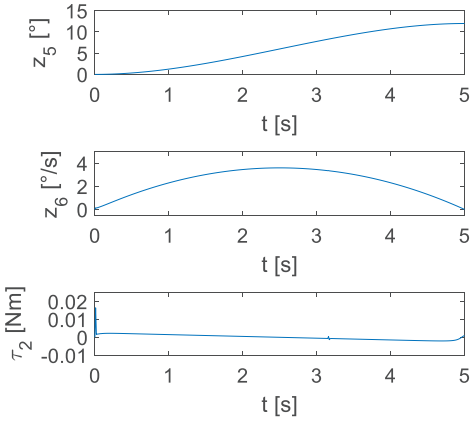


Figura 12. Respuesta del eslabón 2.

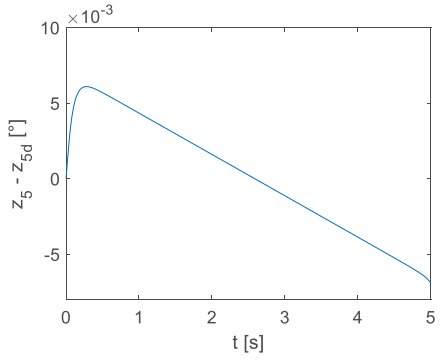


Figura 13. Error angular del eslabón del eslabón 2.

Finalmente, en la Figura 14 se muestra el desplazamiento angular del eslabón 3 (pinza), donde inicia en la posición $z_{30} = 0°$ y en 5 s se va a una posición final de $z_{7f} = 90°$, siguiendo la trayectoria deseada. También, se muestra la velocidad angular requerida y el esfuerzo de control τ_3. En la figura 15 se muestra la respuesta de posición del efector final (7), y en la Figura 16, se muestra en la posición inicial y la posición final al tener los desplazamientos z_1, z_3, z_5 y z_7 mostrados en las Figuras 8, 10 y 12.

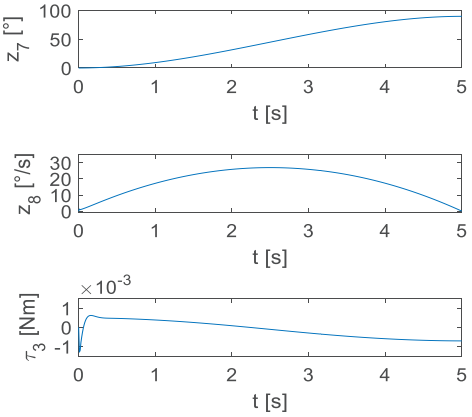


Figura 14. Respuesta del eslabón 3.

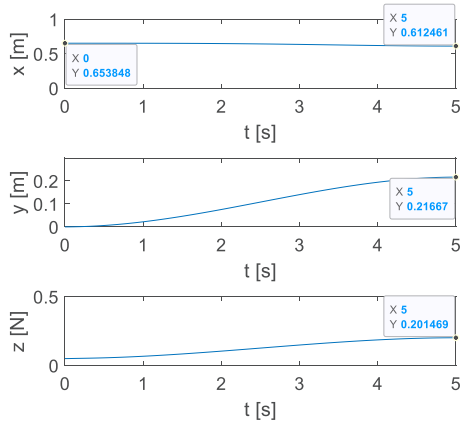


Figura 15. Respuesta del efector final (pinza).

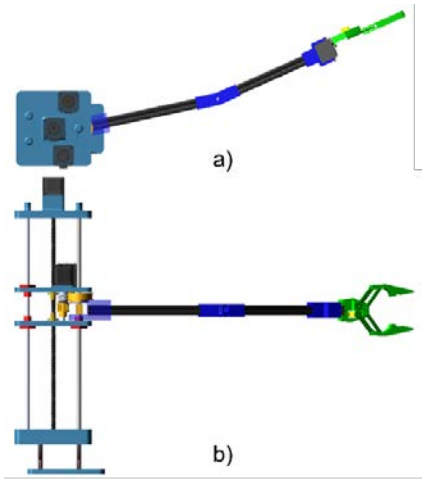


Figura 16. Brazo robótico en posición final: z_1=0.2 m, z_3 =12°, z_5 =12° y z_4 =90°.

ISSN: 2992-8338

Finalmente, el costo del brazo robótico de un prototipo para pruebas iniciales, considerando la impresión de algunos componentes con PLA/ABS, componentes estándar (rodamientos lineales, tuercas, poleas, bandas, tornillo y ejes), perfil modular, se tiene un aproximado de $4,500.00 MXN, ver Figura 17.

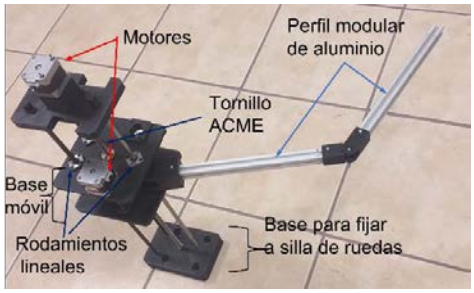


Figura 17. Prototipo físico preliminar del manipulador de 5 GDL.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el diseño de un brazo robótico para adaptar en sillas de ruedas como auxiliar para pacientes que presentan parálisis. El brazo robótico está diseñado para soportar un peso de 1 kg, con un factor de seguridad aproximado de 7. Como trabajo futuro se terminará de construir el prototipo con algunos componentes de material PLA, impresión 3D, para validar el desempeño de este brazo robótico de asistencia. Como actividades futuras, se diseñarán e implementarán las estrategias de control, y se desarrollará un sistema de visión para detección de objetos, para incrementar las funciones del brazo robótico.

REFERENCIAS

F. Achic, J. Montero, C. Penaloza and F. Cuellar, (2016). Hybrid BCI system to operate an electric wheelchair and a robotic arm for navigation and manipulation tasks, 2016 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), Shanghai, China, pp. 249-254, doi: 10.1109/ARSO.2016.7736290.

R. M. Alqasemi, E. J. McCaffrey, K. D. Edwards and R. V. Dubey, (2005). Analysis, evaluation and development of wheelchair-mounted robotic arms, 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005., Chicago, IL, USA, 2005a, pp. 469-472, doi: 10.1109/ICORR.2005.1501144.

Ehrlich M, Zaidel Y, Weiss PL, Melamed Yekel A, Gefen N, Supic L and Ezra Tsur E (2022) Adaptive control of a wheelchair mounted robotic arm with neuromorphically integrated velocity readings and online-learning. *Front. Neurosci*. 16:1007736. doi: 10.3389/fnins.2022.1007736

E. Glory N, V. P and S. K. G, (2021). Development of Speech and Gesture Enabled Wheelchair System for People with Cerebral Palsy, 2021 3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC), Coimbatore, India, pp. 620-624, doi: 10.1109/ICSPC51351.2021.9451712.

INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020. https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx. Fecha de último acceso: 02 de octubre de 2023.

P. Karuppiah, H. Metalia and K. George, (2018). Automation of a wheelchair mounted robotic arm using computer vision interface, 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Houston, TX, USA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2MTC.2018.8409518.

I. P. Ktistakis and N. G. Bourbakis, (2015). A survey on robotic wheelchairs mounted with robotic arms, 2015 National Aerospace and Electronics Conference (NAECON), Dayton, OH, USA, pp. 258-262, doi: 10.1109/NAECON.2015.7443079.

V. Maheu, P. S. Archambault, J. Frappier and F. Routhier, (2011). Evaluation of the JACO robotic arm: Clinico-economic study for powered wheelchair users with upper-extremity disabilities, 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICORR.2011.5975397.

I. P. Ktistakis and N. G. Bourbakis, (2015). A survey on robotic wheelchairs mounted with robotic arms, 2015 National Aerospace and Electronics Conference (NAECON), Dayton, OH, USA, pp. 258-262, doi: 10.1109/NAECON.2015.7443079.

Á. A. Pálsdóttir, S. Dosen, M. Mohammadi and L. A. N. S. Struijk, (2019). Remote Tongue Based Control of a Wheelchair Mounted Assistive Robotic Arm – a proof of concept study," 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Tianjin, China, pp. 1300-1304, doi: 10.1109/ICMA.2019.8816415.

D. A. Rozas Llontop, J. Cornejo, R. Palomares and J. A. Cornejo-Aguilar, (2020). Mechatronics Design and Simulation of Anthropomorphic Robotic Arm mounted on Wheelchair for Supporting Patients with Spastic Cerebral Palsy, 2020 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), Boca del Rio, Mexico, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEV50249.2020.9289665.

Rulik I, Sunny MSH, Sanjuan De Caro JD, Zarif MII, Brahmi B, Ahamed SI, Schultz K, Wang I, Leheng T, Longxiang JP and Rahman MH (2022) Control of a Wheelchair-Mounted 6DOF Assistive Robot with Chin and Finger Joysticks. *Front. Robot*. AI 9:885610. doi: 10.3389/frobt.2022.885610.

L. Sawaqed, A. I. Al-Ali, K. S. Hatamleh and M. A. Jaradat, (2017). Modeling and simulation of a moving robotic arm mounted on wheelchair, 2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), Sharjah, United Arab Emirates, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICMSAO.2017.7934876.

Sunny, M.S.H., Zarif, M.I.I., Rulik, I. et al. (2021). Eye-gaze control of a wheelchair mounted 6DOF assistive robot for activities of daily living. *J NeuroEngineering and Rehabilitation.* 18, 173. https://doi.org/10.1186/s12984-021-00969-2.

D. Robitzski. (2019) This robot arm can help wheelchair users drink coffee, open doors. https://futurism.com/the-byte/robot-arm-wheelchair. Fecha de ultimo acceso: 31-10-2023.

ISSN: 2992-8338

Medical Equipment Operation Monitoring and Recording System

Melvi López-Velázquez[*], Yenci M. Nafate-Toalá [*], and Betty Y. López-Zapata[*]

[*] *Departamento de Ingeniería Biomédica, Universidad Politécnica de Chiapas.*
Carretera Tuxtla Gutiérrez - Portillo Zaragoza Km 21+500, Colonia Las brisas, en Suchiapa, Chiapas. C.P. 29150.
{201159, 201188}@ib.upchiapas.edu.mx, blopez@upchiapas.edu.mx

Abstract: Medical equipment is critical in providing quality healthcare services to patients worldwide. From diagnostic to therapeutic devices, these instruments are essential in the healthcare industry. It is challenging to envision a medical setting without the appropriate biomedical equipment since the longevity of this equipment is a crucial factor in enhancing patient care. However, the useful life of medical equipment depends on several key factors. Maintaining medical equipment is crucial for its useful life. Performing both preventive and corrective maintenance is necessary to guarantee that the equipment meets the manufacturer's specifications and averts potential failures. Proper handling is critical for extending the useful life of any equipment. These factors are critical since medical equipment is essential for patient care and must operate under specific environmental conditions to ensure effectiveness. Medical care is provided in various settings, such as private hospitals, public institutions, and research centers, with the frequency of equipment use varying by institution. This could directly or indirectly impact equipment degradation. To address these challenges and improve medical equipment management, a comprehensive system for monitoring and operation recording has been developed. This system utilizes hardware, software, a database, and an application to collect real-time measurements of temperature, humidity, voltage, current, and power of equipment. The prototype has been validated in a hospital environment and the vital signs monitoring equipment has been chosen as an example due to its widespread use in healthcare facilities and its importance for patient care.

Keywords: Medical Equipment, Healthcare, Lifespan, Maintenance, Environmental Conditions.

1. INTRODUCCIÓN

No se puede subestimar la importancia de mantener los equipos médicos en condiciones óptimas, ya que estos dispositivos desempeñan un papel crucial para brindar atención médica de calidad y salvaguardar vidas. Sin embargo, resulta alarmante comprobar cómo, en muchos casos, dichos equipos médicos no reciben el mantenimiento adecuado, lo que genera costos crecientes y, en última instancia, ineficacia de áreas críticas de los hospitales (Geovanny, 2022).

Es imperativo tomar medidas proactivas y responsables para mantener la confiabilidad y disponibilidad de estos activos críticos en la atención médica. Invertir en mantenimiento no sólo es necesario sino también una inversión inteligente que ahorra costes a largo plazo y garantiza un flujo sanitario ininterrumpido y eficaz (Suniaga, 2023).

La integración de componentes electrónicos avanzados y plataformas digitales en equipos médicos permite un monitoreo ambiental preciso, una mayor eficiencia energética y análisis de datos en tiempo real. En entornos médicos donde las condiciones ambientales son críticas para el bienestar del paciente y la integridad de los equipos médicos y medicamentos sensibles, estas medidas son esenciales (Quintero et al., 2020).

Además, la capacidad de medir el consumo eléctrico en tiempo real ofrece una gestión más efectiva y eficiente de los recursos energéticos, algo crucial en un mundo donde la eficiencia y la sostenibilidad son valores cada vez más importantes (Castillo & Delgado, 2020).

A continuación, se presentan los trabajos tomados como base de la propuesta del sistema, mencionando los puntos importantes analizados de cada trabajo.

Monitoreo inteligente de parámetros de subestaciones y automatización de deslastre de carga de frecuencia (Aseel, Mohammed y Hagem, 2021). Este estudio implementó un Sistema Inteligente de Monitoreo de Parámetros en subestaciones eléctricas utilizando un microcontrolador ESP32S, un medidor de energía PZEM-004T y un sensor de temperatura y humedad DHT11. El sistema permite monitorear en tiempo real factores críticos para evaluar la eficiencia energética, detectar fallas y garantizar la calidad del suministro eléctrico. También incluye la funcionalidad de deslastre de carga de frecuencia para mantener la eficiencia y la calidad del suministro de energía.

Evaluación de corriente, voltaje, potencia, consumo de energía y costos utilizando sensores PZEM-004T y ESP8266 NodeMCU (Surya & Wayan, 2021). Este estudio tiene como objetivo evaluar la precisión del sensor PZEM-004T cuando se utiliza junto con NodeMCU ESP8266 para medir los costos de corriente, voltaje, potencia y consumo eléctrico en los hogares. Los experimentos consisten en comparar las medidas del sensor PZEM-004T con un amperímetro. Los resultados proporcionan mediciones detalladas de corriente, voltaje, potencia y costos asociados para el consumo de electricidad del hogar. Además, se evalúa

ISSN: 2992-8338

el error porcentual de las mediciones del sensor en relación con el amperímetro. El objetivo principal de esta investigación es determinar la precisión y confiabilidad del sensor PZEM-004T en el monitoreo del consumo de electricidad del hogar.

Los equipos médicos desempeñan un papel crucial en la atención al paciente, y cualquier fallo o mal funcionamiento de estos dispositivos puede tener graves consecuencias. La falta de supervisión de variables eléctricas como la corriente y el voltaje y de condiciones ambientales como la temperatura y la humedad en entornos médicos críticos se ha identificado como una preocupación importante.

Para abordar este problema, proponemos la creación de un sistema de monitoreo y registro de operación en equipos médicos. Este sistema combina hardware de alta precisión, sensores especializados, software de control, una base de datos centralizada y una interfaz de usuario accesible a través de una aplicación web. El objetivo es ofrecer una solución eficaz para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos médicos, optimizar el consumo de energía y prevenir fallos críticos.

La sección 2 describirá la metodología y describirá el proceso de desarrollo del proyecto. La sección 3 proporcionará detalles sobre las tecnologías y herramientas utilizadas en el proyecto. La sección 4 presentará mediciones y comparaciones realizadas entre el sistema desarrollado y los dispositivos comerciales. Por último, en la sección 5, las conclusiones resumirán los logros clave del proyecto.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto implicó las etapas siguientes (figura 1).

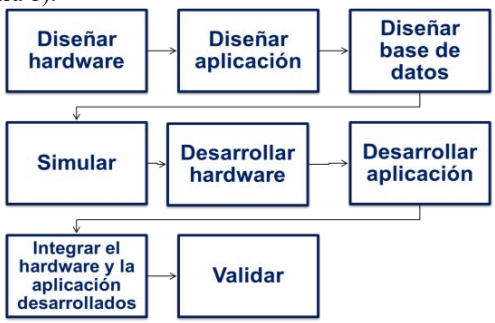


Figura 1: *Diagrama de bloques.*

Descripción de cada etapa

1. Diseñar hardware:
   En esta etapa se planificó y se diseñó la parte física del sistema, incluyendo la selección de componentes como la placa ESP32, el medidor de potencia PZEM-004T y el sensor de temperatura y humedad DHT11. Se definieron las conexiones eléctricas y se creó un diseño para el montaje de estos componentes en el dispositivo.

2. Diseñar aplicación:
   Aquí se creó un diseño lógico para la interfaz de usuario en PHP que permitirá a los usuarios interactuar con el sistema. Se establecieron las funcionalidades que la aplicación proporcionará, como la autenticación de inicio de sesión y la visualización de tablas de usuarios, datos de sensores y mantenimiento.

3. Diseñar base de datos:
   Se definió la estructura de la base de datos que almacenará la información del sistema. Esto incluyó la creación de tablas para usuarios, datos de sensores y registros de mantenimiento.

4. Simular:
   En esta etapa se realizaron pruebas virtuales para asegurarse de que el diseño del sistema funcione como se espera.

5. Desarrollar hardware:
   Se procedió a la construcción física del hardware, incluyendo la placa ESP32, el medidor de potencia y el sensor de temperatura y humedad. Los componentes se ensamblaron siguiendo el diseño previamente planificado.

6. Desarrollar aplicación:
   En esta etapa se escribió el código de la aplicación en PHP que forma la interfaz de usuario. Se implementó la lógica para la autenticación de inicio de sesión y la visualización de tablas de usuarios, datos de sensores y mantenimiento.

7. Integrar el hardware y la aplicación desarrollados:
Consistió en unir físicamente el hardware (placa ESP32, medidor de potencia PZEM004T y sensor DHT11) con la aplicación de software (interfaz de usuario en PHP). Se realizaron pruebas para asegurar que el hardware y la aplicación se comunicaran de manera efectiva, se ajustaron configuraciones y se verificó que todo funcionara en conjunto de manera óptima antes de la validación final.

8. Validar:
   Se realizaron pruebas del sistema completo para garantizar que funcionara correctamente en un entorno real. Se verificó que los datos se recopilaran y almacenaran correctamente en la base de datos, y que la interfaz de usuario en PHP funcionara según las necesidades, incluyendo la autenticación y los accesos a las tablas por parte de los administradores y los lectores.

3. TECNOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS

Los componentes clave que han dado vida a este sistema incluyen una placa ESP32 de 30 pines que actúa como el eje central de la operación, un medidor de potencia PZEM004T utilizado para medir datos críticos como energía, voltaje, corriente y potencia, y un sensor de temperatura y humedad DHT11 encargado de suministrar información detallada sobre las condiciones ambientales.

Además, se ha diseñado y desarrollado una interfaz de usuario basada en PHP, que incluye un sistema de autenticación de inicio de sesión. En términos de funcionalidad, esta interfaz de usuario sirve como una herramienta versátil y ofrece dos niveles de acceso diferentes. Los administradores poseen la capacidad de administrar usuarios y tienen acceso completo a tres tablas específicas: usuarios, datos de sensores y registros de mantenimiento. Por otro lado, los lectores tienen acceso limitado y su función se restringe a visualizar dichas tablas sin posibilidad de realizar modificaciones. Finalmente, para garantizar una gestión eficiente y un almacenamiento organizado de los datos, se ha implementado una base de datos MySQL.

Esta base de datos juega un papel crucial en el almacenamiento de información pertinente sobre usuarios, registros de sensores y registros de mantenimiento, lo que ayuda enormemente al funcionamiento fluido y eficiente del sistema en su conjunto.

ISSN: 2992-8338

4. RESULTADOS

Para evaluar las mediciones realizadas por el sistema desarrollado, se utilizaron dos dispositivos de medición disponibles en el mercado: un higrómetro para medir la temperatura y la humedad, y una pinza amperimétrica para medir la corriente y el voltaje (como se muestra en las figuras 2-4).

Figura 2: *Prototipo final desarrollado, listo para probar su funcionalidad.*

a) b)

Figura 3: *Las herramientas comerciales utilizadas incluyen: a) Termohigrómetro HTC 2 con sonda para mediciones de temperatura y humedad, equipado con un reloj, y b) Pinza amperimétrica digital Aneng St180 con 4000 cuentas para múltiples opciones de medición.*

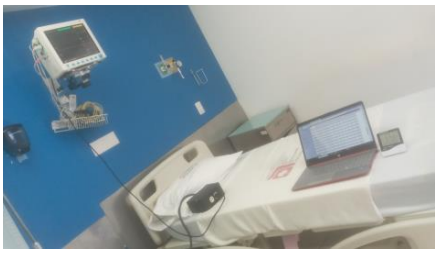


Figura 4: *Todo el sistema fue probado para verificar el funcionamiento adecuado en un entorno del mundo real.*

Las mediciones de temperatura, humedad, voltaje y corriente tanto del sistema desarrollado como de las herramientas comerciales se analizaron utilizando herramientas estadísticas como medidas de posición, tendencia central y dispersión. Estas herramientas se utilizaron para resumir y describir los conjuntos de datos de forma objetiva. Estas medidas son fundamentales en estadística para resumir y comprender las distribuciones de los datos, proporcionando información valiosa sobre la tendencia central y la variabilidad en un conjunto de observaciones (Zapata, F, 2020).

Para las mediciones de posición se utilizó la mediana (Me), que representa el valor en el centro de un conjunto de datos ordenados de menor a mayor.

Si el número de puntos de datos (n) es impar: Mediana = valor en la posición (n + 1) / 2.

Si el número de puntos de datos (n) es par: Mediana = promedio de valores en las posiciones (n/2) y (n/2 + 1).

Los tipos de cuartiles más comunes son el primer cuartil (Q1), la mediana (Me o Q2) y el tercer cuartil (Q3).

Q1: Valor en la posición (n+1) /4.

Q2 (mediana): Valor en la posición 2(n + 1) / 4.

Q3: Valor en la posición 3(n + 1) / 4.

Medidas de tendencia central: Son valores ubicados en el centro de un conjunto de datos ordenados por magnitud.

Media aritmética ($\bar{X}$): Es el promedio de todos los valores de un conjunto de datos. Fórmula: $\bar{X} = (\Sigma x) / n$, donde Σx es la suma de todos los valores y n es el número de puntos de datos.

Mediana (Me): También es una medida de tendencia central.

Moda (Mo): Es el valor o valores que ocurren con mayor frecuencia en un conjunto de datos.

Las medidas de dispersión son números que indican si una variable se mueve más o menos que otra variable.

Rango (R): Diferencia entre los valores máximo y mínimo de un conjunto de datos.

Desviación típica (σ o s): $\sigma = \sqrt{((\Sigma (x - \bar{X})^2) / N)}$, donde Σ representa la suma, x son los valores individuales, $\bar{X}$ es la media, y N es la cantidad de datos.

Fórmula (para una muestra): $s = \sqrt{((\Sigma (x - \bar{X})^2) / (n - 1))}$, donde n es el número de puntos de datos de la muestra.

Varianza (σ^2 o s^2): $\sigma^2 = ((\Sigma (x - \bar{X})^2) / N)$.

Fórmula (para una muestra): $s^2 = ((\Sigma (xi- \bar{X})^2) / (n - 1))$.

Se crearon gráficos para representar los datos para una mejor visualización de los diferentes parámetros de medición, como se muestra en las Figuras 5-8.

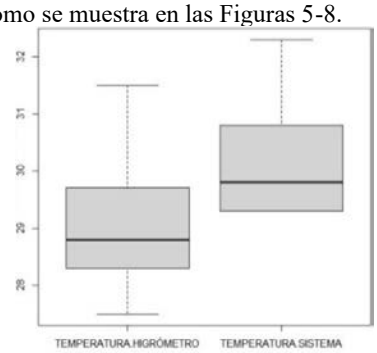


Figura 5: *Diagrama de Caja y Bigotes de Temperatura del sistema y el Higrómetro. La figura muestra distribuciones de temperatura en dos conjuntos de datos: uno de un sistema desarrollado y otro de un higrómetro. Ambos conjuntos de datos tienen un tamaño de muestra de 66 observaciones y muestran la mediana, los valores mínimo y máximo, los cuartiles y la ausencia de valores atípicos.*

Como se evidencia en la Figura 5 para el sistema desarrollado, se observa una mediana de 29.8 con un rango de temperatura que varía de 29.3 a 32.3. Los cuartiles indican que el 25% de las observaciones están por debajo de 29.3 y el 25% por encima de 30.8. La ausencia de valores atípicos sugiere cierta coherencia en las mediciones de temperatura en este sistema.

Además, para el higrómetro, la mediana es 28.8 y el rango de temperatura oscila entre 27.5 y 31.5. Los cuartiles indican que el 25% de las observaciones están por debajo de 28.3 y el 25% por encima de 29.75. Al igual que en el sistema desarrollado, no hay valores atípicos en las mediciones del higrómetro, lo que sugiere coherencia en las observaciones de temperatura en este dispositivo.

El análisis reveló diferencias significativas entre las mediciones de temperatura en el sistema y el higrómetro,

ISSN: 2992-8338

lo que implica posibles discrepancias entre las mediciones de temperatura de ambos dispositivos.

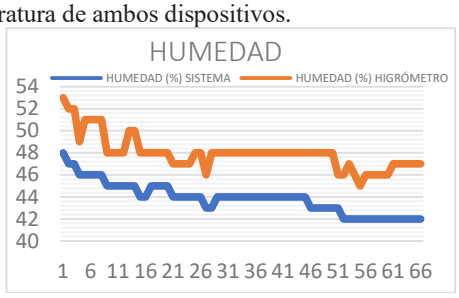


Figura 6: *Variable ambiental medida. Los datos sugieren que las mediciones de humedad realizadas por el higrómetro tienden a tener valores promedio más altos y una mayor variabilidad en comparación con las mediciones del sistema. El sistema parece proporcionar mediciones de humedad más estables y concentradas dentro de un rango más estrecho.*

Las discrepancias en las mediciones de temperatura y humedad podrían atribuirse a factores como una calibración deficiente, la colocación del sensor, tolerancias de fabricación y errores en la recogida de datos.

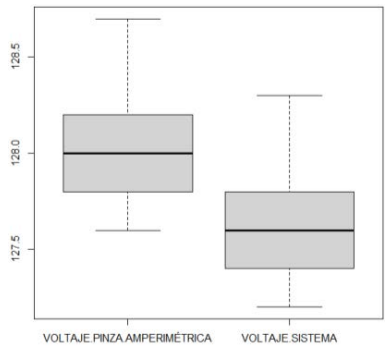


Figura 7: *Gráfico de caja y bigotes del voltaje del sistema y la pinza amperimétrica. Los cuartiles demuestran que el 25% de las observaciones están por debajo de 127.4 y el 25% están por encima de 127.8 en el sistema, mientras que de 127.8 a 128.2 en la pinza amperimétrica.*

La Figura 7 ilustra una comparación de los diagramas de caja y bigotes para mediciones de voltaje realizadas tanto por el sistema como por la pinza, con un tamaño de muestra de 66 observaciones para cada uno.

Los hallazgos notables revelan que ambos conjuntos de datos muestran una mediana similar, lo que indica que el valor medio es de alrededor de 127.6 para el sistema y 128 para la pinza amperimétrica.

El rango de voltaje en ambas mediciones es relativamente estrecho, y abarca de 127.2 a 128.3 en el sistema y de 127.6 a 128.7 en la pinza amperimétrica.

El rango intercuartílico (RIC) en ambos casos es 0.4, lo que sugiere una concentración de observaciones dentro de este rango estrecho.

Tanto el sistema como la pinza amperimétrica tienen la misma varianza de 33.34 y una desviación estándar de 0.25. Esto sugiere que la variabilidad en las mediciones de voltaje es similar para ambos dispositivos. Además, cabe señalar que no se han identificado valores atípicos en ninguno de los conjuntos de datos.

Se compararon las mediciones de voltaje entre el sistema y la pinza amperimétrica, utilizando estadísticas descriptivas y un análisis de hipótesis. Se comprobó que las mediciones de voltaje en ambos dispositivos eran bastante similares en términos de tendencia central, dispersión y ausencia de valores atípicos.

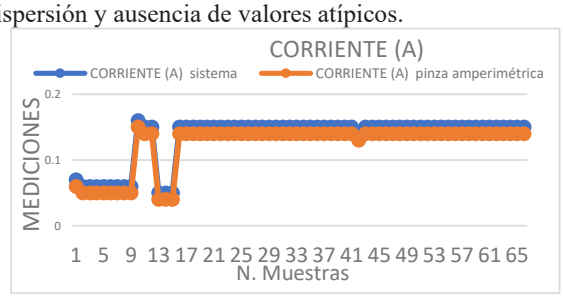


Figura 8: *Variable de corriente registrada en tiempo real.*

Además, se realizó una prueba estadística conocida como prueba Z. La prueba Z se utilizó para comparar las diferencias entre dos muestras en cuatro parámetros diferentes: temperatura, humedad, voltaje y corriente. Se eligió esta prueba estadística por los siguientes motivos (Benites, 2023):

Comparación de medias: este método es particularmente útil para determinar si las medias de dos muestras son estadísticamente diferentes. En este caso, el objetivo era comprobar si las mediciones tomadas en el sistema y las mediciones del instrumento de referencia (higrómetro para temperatura y humedad, y pinza amperimétrica para voltaje y corriente) diferían significativamente.

Supuestos de varianza: es apropiado cuando se conoce la varianza de la población y los tamaños de muestra son suficientemente grandes.

La prueba de hipótesis se utiliza comúnmente para evaluar si una diferencia observada entre dos grupos es estadísticamente significativa.

Se formularon hipótesis nulas (H0) que afirmaban que no había diferencias entre los grupos y se compararon con hipótesis alternativas (H1) que sugerían que existían diferencias.

Según los resultados de las pruebas z para dos medias muestrales, se puede observar lo siguiente:

Temperatura: El estadístico de la prueba z es aproximadamente 6.89, que es mucho más alto que el valor crítico para una prueba de dos colas. Esto implica evidencia sólida para rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa, indicando que las temperaturas del sistema y del higrómetro son significativamente diferentes.

Humedad: El estadístico de la prueba z es aproximadamente -15.67, que es mucho menor que el valor crítico para una prueba de dos colas. Esto sugiere que los niveles de humedad en el sistema difieren significativamente de lo que indica el higrómetro.

La prueba Z para el voltaje no proporcionó pruebas sólidas para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que las mediciones de voltaje en el sistema y la pinza amperimétrica son comparables y no difieren significativamente.

Corriente: La prueba z arrojó una estadística de aproximadamente 0.50, superando el valor crítico para una prueba de dos colas. Con base en esto, la evidencia es inadecuada para rechazar la hipótesis nula, lo que indica que

ISSN: 2992-8338

las corrientes del sistema y la pinza amperimétrica no difieren significativamente.

A continuación, se muestran algunas de las pantallas de la interfaz de usuario creada.

El Sistema de Registro y Monitoreo de Operación de Equipos Médicos tiene acceso restringido a través de una pantalla de inicio de sesión (Figura 9).

Figura 9: *Inicio de sesión.*

Página de inicio del menú de administración para administradores.

Desde este módulo, los administradores pueden crear, editar o eliminar usuarios (figura 10-12).

Figura 10: *Menú de administración.*

Figura 11: *Crear nuevo usuario.*

Figura 12: *Editar usuario existente.*

Desde este módulo, los usuarios administradores pueden crear nuevos registros de mantenimiento (figura 13).

Figura 13: *Formulario para agregar nuevo mantenimiento.*

A continuación, se muestran las tablas accesibles para todos los usuarios finales, incluidos administradores y lectores (Figura 14).

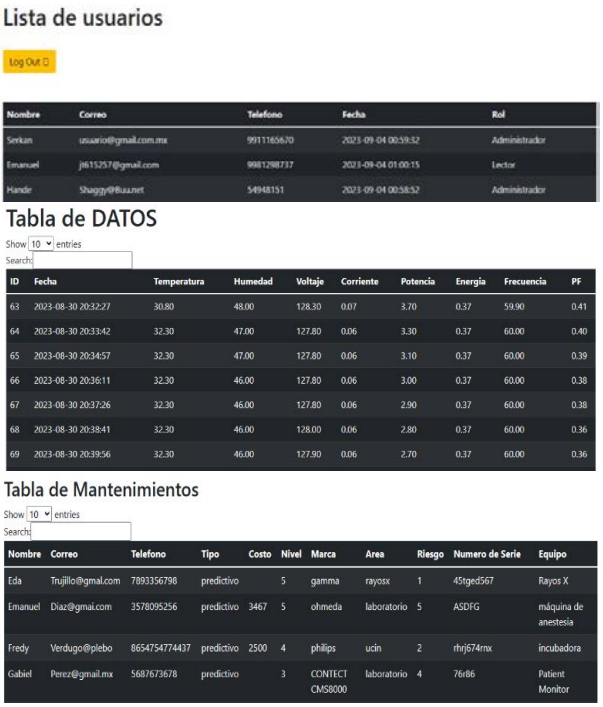


Figura 14: *Visualización de tres tablas específicas: usuarios, datos de sensores y registros de mantenimiento.*

El prototipo se comunica con la interfaz PHP y la base de datos MySQL a través de XAMPP para proporcionar una solución completa para el monitoreo y visualización en tiempo real de temperatura, humedad, voltaje, corriente y frecuencia. El ESP32 recopila datos, los almacena en una base de datos MySQL y la página web PHP proporciona una interfaz fácil de usar para ver estos datos.

5. CONCLUSIONES

La importancia de mantener los equipos médicos en condiciones óptimas radica no sólo en proporcionar una atención de calidad a los pacientes, sino también en la eficiencia operativa y la gestión de costes de las instituciones médicas.

La metodología empleada en el desarrollo del proyecto, que abarca desde el diseño del hardware hasta la integración de la aplicación y el hardware, ha demostrado su eficacia a la hora de crear una solución integral. La tecnología

ISSN: 2992-8338

y las herramientas utilizadas, como la placa ESP32, la interfaz de usuario PHP y la base de datos MySQL, han contribuido al funcionamiento ordenado y eficiente del sistema.

Este sistema aborda eficazmente los retos asociados a la vida útil de los equipos médicos, haciendo hincapié en la importancia del mantenimiento preventivo y correctivo junto con el uso adecuado de los dispositivos. La utilización de tecnologías avanzadas, como la placa ESP32, el medidor de potencia PZEM004T y el sensor DHT11, permite monitorizar con precisión y en tiempo real parámetros críticos como la temperatura, la humedad, el voltaje, la corriente y la potencia.

La medición de variables críticas como temperatura, humedad, corriente eléctrica y voltaje en equipos médicos juega un papel fundamental para salvaguardar la seguridad del paciente, la eficiencia operativa, el cumplimiento de las regulaciones y la utilización eficaz de los recursos en entornos sanitarios.

A partir del análisis de las mediciones de temperatura, humedad, voltaje y corriente, pueden extraerse las siguientes conclusiones y aportaciones del estudio:

Las mediciones de temperatura y humedad entre el sistema y el higrómetro mostraron discrepancias significativas. Para solucionar estas discrepancias, es importante realizar un análisis más detallado y tener en cuenta la calibración del dispositivo, la ubicación del sensor, las tolerancias de fabricación, los errores humanos o técnicos en la recolección de datos y cualquier otro factor que pueda influir en las mediciones. Además, para minimizar los errores humanos es crucial garantizar procedimientos de recogida de datos coherentes y estandarizados.

En cuanto al voltaje, se comprobó que las mediciones realizadas tanto por el sistema como por la pinza amperimétrica son comparables y no muestran diferencias significativas en términos de tendencia central, dispersión y valores atípicos.

En cuanto a la corriente, no se encontraron diferencias significativas entre el sistema y la pinza amperimétrica.

Este estudio proporciona una evaluación científica de las mediciones del sistema en comparación con los instrumentos de referencia, contribuyendo a la comprensión de la fiabilidad de las mediciones en entornos específicos.

Su aplicación promete un impacto positivo en la eficiencia operativa, la sostenibilidad medioambiental y, lo que es más importante, la calidad de la atención al paciente. Este sistema de supervisión y registro no sólo mejora el mantenimiento y la gestión de los equipos médicos, sino que también proporciona una valiosa herramienta para la toma de decisiones basada en datos en entornos sanitarios.

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Dr. Megchún Alpízar Andrés de la Policlínica de Especialidades en Chiapas por su valiosa colaboración en la consecución de nuestros objetivos. A la Dra. Martínez Cancino Diana Paulina, agradecemos su excepcional liderazgo, y visión clara, fundamentales para el éxito de este proyecto.

REFERENCIAS

Aseel, Y., Mohammed, R. M. and Hagem, R. M. (2021) Smart monitoring system for substation' parameters and automatic under frequency load shedding, Cloudfront.net. Available at: 02_AJCSE_148_21_compressed-libre.pdf (d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net)

Benites, L. (2023) Calculadora de prueba Z de dos muestras, Statologos. Available at: https://statologos.com/calculadora-de-la-prueba-z-de-dos-muestras/ (Accessed: October 27, 2023).

Castillo, R., & Delgado, J. A. (2020). Análisis de los criterios de seguridad eléctrica en dispositivos biomédicos y equipos de medición en entornos de laboratorio sin condiciones ambientales controladas. CIT Informacion Tecnologica, 31(1), 261–272. https://doi.org/10.4067/s0718-07642020000100261

Geovanny, M. R. F. (2022). Sugerencia para optimizar la administración de mantenimiento con el fin de reducir los períodos de inactividad de los dispositivos médicos en una entidad de salud en Bogotá. Caso de estudio: salas de cirugía. https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/3237

Quintero, R. S. G. et al. (2020) "La Calidad de los Servicios de Salud: Evaluando Eficiencia, Eficacia y Equidad" - Infodir, Volumen 0, Número 35. Available at: https://revinfodir.sld.cu/index.php/infodir/article/view/974 (Accessed: October 1, 2023).

Suniaga, S. (2023) "La Importancia del Mantenimiento Proactivo para Prevenir Fallos y Mejorar la Eficiacia" - Fracttal.com, 24 May. Available at: https://www.fracttal.com/es/blog/mantenimiento-proactivo (Accessed: October 6, 2023).

Surya, A & Wayan, A. (2021). Analisis arus, tegangan, daya, energi, dan biaya pada sensor pzem-004t ver basis nodemcu esp8266. https://www.researchgate.net/publication/357823583

Zapata, F. (2020) Medidas de posición, de tendencia central y dispersión, Lifeder. Available at: https://www.lifeder.com/medidas-de-posicion/ (Accessed: November 8, 2023).

ISSN: 2992-8338

Control Oriented Mathematical Models of the Glucose-Insulin System for the Artificial Pancreas

Erandi Alejandra Arroyo-Trejo *, **Carlos Manuel Astorga-Zaragoza** *, **Rodolfo Amalio Vargas-Méndez** *

* *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: {m23ce008, carlos.az, rodolfo.vm}@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: A synthesis of the evolution of artificial pancreas development is presented. An exhaustive analysis of the classifications of mathematical models focused on glucose control for the artificial pancreas is made. Three mathematical models widely used in the representation of metabolism in individuals with type 1 diabetes *mellitus*, who take an important role in the development of control algorithms, are detailed.

Keywords: Glucose-insulin system, type 1 diabetes *mellitus*, artificial pancreas, mathematical modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Los principales tipos de diabetes *mellitus* incluyen la tipo 1 (DMT1), la tipo 2 (DMT2) y la gestacional (DMG). La DMT1 es una enfermedad autoinmune que destruye las células productoras de insulina β en el páncreas, por tal motivo, las personas con esta enfermedad dependen de la administración exógena de insulina como único tratamiento viable. La DMT2 se caracteriza por una producción insuficiente de insulina secretada por el páncreas, incapaz de regular eficazmente los niveles de glucosa debido a la resistencia a la insulina. Las personas con DMT2 mantienen niveles saludables de glucosa mediante una dieta equilibrada, actividad física y en última instancia, medicamentos orales o a la administración de insulina. La DMG, que se desarrolla durante el embarazo, tiende a desaparecer después del parto.

Dado que las personas con DMT1 dependen de la insulina exógena y con el propósito de regular los niveles de glucosa en la sangre de manera automática, se desarrollan algoritmos de control para páncreas artificial que buscan emular la función natural del páncreas, evitando tanto la hipoglucemia (por debajo de 70 mg/dL) como la hiperglucemia (por encima de 180 mg/dL, en el caso posprandial) en personas que padecen diabetes.

Se ofrece una visión panorámica de la evolución histórica del páncreas artificial y las tendencias actuales, proporcionando una base para futuras investigaciones en ingeniería biomédica y sistemas de control.

2. DESARROLLO DEL PÁNCREAS ARTIFICIAL

A partir del descubrimiento de la insulina en 1921 por Nicolae Paulescu (Bența et al., 2021), la DMT1 ha dejado de ser una enfermedad mortal para convertirse en una condición que se puede controlar. Sin embargo, con este avance surgió un nuevo desafío: el cálculo de la dosis adecuada para administrar y así mantener niveles normoglucémicos, que continúa siendo un desafío en la actualidad. Minimizar la dosis de insulina puede resultar en hiperglucemia, mientras que las dosis elevadas pueden provocar hipoglucemia. Estas condiciones pueden provocar complicaciones en la salud como la retinopatía diabética, neuropatía, nefropatía, pérdida del conocimiento, coma o incluso la muerte.

La jeringa fue el único método utilizado para administrar la insulina durante un período de 40 años después de su descubrimiento. Luego, en la década de los 70, surgió el primer sistema de infusión continua de insulina subcutánea (ICIS), también conocido como bomba de insulina. Después, en 1999 se introdujo el monitoreo continuo de glucosa (MCG), un sensor que toma muestras de glucosa intersticial frecuentemente (Kovatchev, 2019). Para lograr la automatización de la regulación de la glucosa, al ICIS y al MCG se añade un algoritmo de control para dar como resultado el páncreas artificial, el cual es un sistema biomédico de lazo cerrado cuyo propósito es emular el funcionamiento del páncreas natural, donde el algoritmo de control calcula la cantidad de insulina que se debe administrar. El páncreas artificial realiza la administración de insulina de manera subcutánea, lo que

ISSN: 2992-8338

implica un retardo considerable en la acción de la insulina, a diferencia del páncreas real, que se puede considerar, la administra de manera intravenosa.

Otro avance en el tratamiento de la DMT1 sucedió en 2008 y 2013, cuando el simulador metabólico UVA/Padova fue aprobado por la FDA (*Food and Drug Administration*) para reemplazar pruebas preclínicas en animales, afinar y validar los algoritmos de control. Esto aceleró el desarrollo de esquemas de regulación y dispositivos para pacientes con DMT1. Los sistemas de páncreas artificial disponibles actualmente son conocidos como dispositivos de dosificación automática de insulina. En 2016, la FDA aprobó el sistema MiniMed 670G de Medtronic, el primer sistema páncreas artificial de lazo cerrado en el mercado diseñado para pacientes ambulatorios y es el único dispositivo aprobado por COFEPRIS en México. Desde entonces, se han aprobado varios dispositivos de dosificación automática de insulina como el Diabeloop DBLG1 en 2018, Tandem Control-IQ en 2019, Minimed 770 g y CamAPP FX en 2020, Omnipod 5 y Tidepool Loop en 2022, e iLet Bionic Pancreas y Minimed 780G en el año 2023 (De Loza et al., 2023).

Los algoritmos de control también han evolucionado a lo largo del tiempo, estos se describen por Quiroz (2019) en tres eras principales. Una de ellas se refiere a los algoritmos de control basados en modelos matemáticos que abarcan de 1980 hasta la actualidad. Durante este período, el desafío ha sido desarrollar algoritmos basados en información fisiológica del metabolismo, capaces de regular la glucosa en la sangre, incluso ante la ingesta de alimentos y las variaciones metabólicas de cada paciente. Estos algoritmos se han probado en sistemas de páncreas artificial en ensayos ambulatorios con infusión y medición subcutánea de insulina.

3. CLASIFICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DEL SISTEMA GLUCOSA-INSULINA

Makroglou et al. (2006) realizó una clasificación matemática que incluye modelos en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO), ecuaciones diferenciales de retardo (EDR), ecuaciones diferenciales parciales (EDP) y ecuaciones integro-diferenciales (EID). Dentro de los modelos EDO más usados se encuentra el modelo mínimo de Bergman reportado en 1981, el modelo de Sturis en 1991 y el modelo propuesto por Parker en 2001. Un modelo EDR basado en el de Sturis es el propuesto por Tolic en el 2000. Un modelo EDR discreto no lineal fue propuesto por Palumbo et al. (2012) para ser usado en sujetos con DMT1 y DMT2, aunque su aplicación principal ha sido en la DMT2. Un modelo PDE es el propuesto por Boutayeb y Darouach en 2002, un modelo propuesto por Aslanidi en 2002 y el modelo de Bertram y Pernarowsky de 1998. Entre los modelos EID están los propuestos por Grodsky en 1972, Gaetano y Arino en el año 2000, Li en 2001 y Mukhopadhyay en 2004. Varios de estos trabajos han tomado como base el modelo mínimo de Bergman.

Wilinska and Hovorka (2008) clasifican los modelos glucorreguladores en dos categorías: basados en datos y conceptuales. Los modelos basados en datos estiman parámetros a partir de datos experimentales, mientras que los modelos conceptuales utilizan conocimientos fisiológicos y procesos metabólicos, donde cada órgano o tejido es tratado como un compartimento. Entre los submodelos mencionados se encuentran los de la cinética de la glucosa y la acción de la insulina, los de absorción de glucosa en el intestino y los de la insulina subcutánea. En la Figura 1 se presentan algunos modelos reportados, se indica el nombre del primer autor y el año en que fueron propuestos.

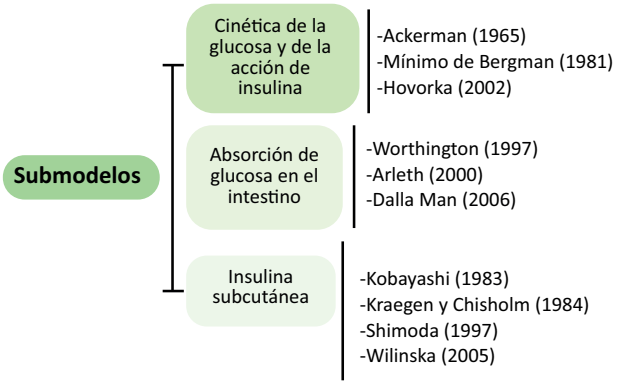


Figura 1. Clasificación de Wilinska and Hovorka (2008).

Zimei (2013) se enfoca en modelos de pacientes virtuales y de insulina subcutánea (ver Tabla 1). El grupo más extenso es el de pacientes virtuales, se divide en dos categorías: modelos farmacocinéticos (FC), que expresan la cinética de absorción y determinan algunos compartimentos relacionados con la eliminación y la absorción; y modelos fisiológicos, donde se consideran compartimentos el sistema de órganos. Los modelos FC son más fáciles de identificar a partir de datos experimentales en comparación con los segundos. Sin embargo, al tener modelos de orden inferior es posible la estimación más precisa de los parámetros con un conjunto de datos de glucosa o insulina. El otro grupo, más pequeño, de modelos de insulina subcutánea, se divide en modelos compartimentales y no compartimentales, donde los últimos son fisiológicamente más precisos, aunque el costo computacional es tan grande que no es viable para su uso en tiempo real o simulación.

Kaçar et al. (2020) destaca la importancia del modelado y control de sistemas glucosa-insulina en los últimos 50 años. Selecciona un reducido número de modelos y los organiza en tres grupos generales: sistemas lineales, no lineales y modelos integrales. El grupo de sistemas lineales está constituido por el modelo de Ackerman propuesto en 1973 y el modelo de Ceresa en 1968; en el grupo de no lineales está el modelo mínimo de Bergman y el de Furler de 1985. Los modelos integrales dan conocimiento del

ISSN: 2992-8338

Tabla 1. Clasificación de Zimei (2013).

Modelos matemáticos				
Pacientes Virtuales			Insulina subcutánea	
Farmacocinético		Fisiológico	Compartimental	No Compartimental
Bolie (1961)	Gatewood (1968)	Foster (1973)	Kobayashi (1983)	Mosekilde (1989)
Ackerman (1965)	Srinivasan (1970)	Guyton (1978)	Kraegen (1984)	Trajanoski (1993)
Frost (1973)	Dalla Man (2007)	Sorensen (1985)	Puckett (1995)	
Sherwin (1974)	Mínimo de Bergman (1979)	Pucket (1992, 1995)	Shimoda (1997)	
Cerasi (1974)	Sturis (1991)	Salzsieder (1985)	Hovorka (1993)	
Insel (1975)	Hovorka (2004)	Cobelli (1982)	Wilinska (2005)	

comportamiento fisiológico complejo, generalmente son de alto orden y muchos parámetros, entre ellos está el modelo de Sorensen de 1985, el de Cobelli del mismo año y el de Hovorka de 2002.

En años recientes, se han propuesto modelos de ecuaciones diferenciales de orden fraccionario para el sistema glucosa-insulina con el propósito de controlar los niveles de glucosa en la sangre (Mehmood et al., 2020). Estos modelos permiten explicar la memoria y las características de calidad de este proceso biológico (Ozturk et al., 2023).

Chandrasekhar and Padhi (2023) indican que los modelos esenciales para el desarrollo de algoritmos de control para el páncreas artificial son de dos tipos: basados en modelos y basados en datos. Los basados en modelos tienen la ventaja de describir la dinámica del sistema y calcular la entrada de un sistema de control. Además, permiten realizar pruebas in silico (simulación por computadora) y validar algoritmos para el páncreas artificial. Estos se dividen en dos: i) modelos mínimos y, ii) modelos de alta fidelidad. Los modelos mínimos están orientados al control, intentan replicar la dinámica glucosa-insulina para comprender el comportamiento del sistema y facilitar el desarrollo de los algoritmos de control en lazo cerrado. Esta categoría incluye submodelos que describen el proceso fisiológico subyacente, como a) modelos glucorreguladores, b) modelos de alimentación y c) modelos de cinética de insulina subcutánea, como se muestra en la Figura 2. Por otro lado, los modelos de alta fidelidad imitan la dinámica interna del cuerpo, incluyendo procesos como la función del hígado, la producción de glucosa y de glucagón. Estos modelos son complejos, tienen numerosos estados y parámetros, y se usan para verificar y probar algoritmos de páncreas artificial previo a ensayos clínicos. Además, toman en cuenta la variabilidad intrapaciente. Un ejemplo es el simulador UVA/Padova que utiliza el modelo de Dalla Man donde se simulan poblaciones virtuales de individuos con DMT1. El grupo de Hovorka uso un simulador con un modelo de alta fidelidad para desarrollar un sistema de páncreas artificial para niños y adolescentes con DMT1.

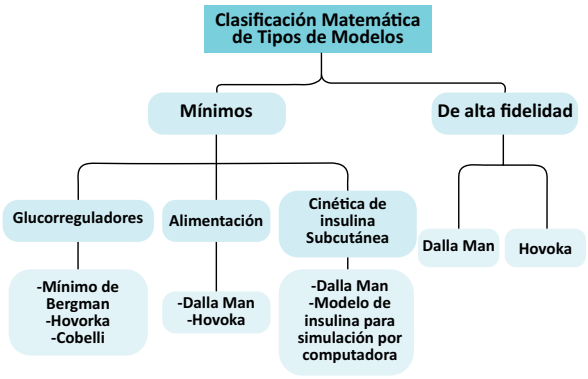


Figura 2. Clasificación dada por Chandrasekhar and Padhi (2023).

Algunos modelos enfocados en individuos con DMT1 se mencionan a continuación. De acuerdo con Mehmood et al. (2020), el modelo mínimo de Bergman es el más usado, pero sugiere que el de Hovorka podría ser más eficaz. Otros modelos, como el lineal de Magdelaine y el de Grossman que simula pacientes virtuales con información proporcionada por la bomba MiniMed CareLink presentan comportamientos más realistas (Hoyos et al., 2021). Quiroz (2019) describe el modelo de Sorensen como el más complejo del metabolismo de la glucosa. Este modelo se encuentra dividido en los siguientes cuatro subsistemas: el de glucosa (8 ecuaciones), el de insulina (10 ecuaciones), el de glucagón (1 ecuación) y las tasas metabólicas auxiliares (3 ecuaciones). Cuenta con 6 compartimientos fisiológicos, el cerebro, el corazón y pulmones, los tejidos periféricos, el intestino, el hígado y los riñones. Uno de los modelos no lineales descrito es el de Cobelli que consta de un subsistema de glucosa, uno de insulina y otro de glucagón, representado por 23 funciones metabólicas y 46 parámetros. El modelo de Sturis de 3 compartimentos y 6 EDO, considera procesos metabólicos en la regulación de glucosa. El modelo de Dalla Man, incorporado en el simulador UVA/Padova en 2007 (Nath et al., 2018), se considera complejo porque captura la dinámica interna del cuerpo con alta precisión, considera el efecto no lineal en el vaciado gástrico y el retraso de la insulina administrada por vía subcutánea. Tiene seis subsistemas como el de glucosa, el de insulina, el de hígado, el tracto intestinal, el de tejidos musculares y adiposos y el de células β.

4. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DE LOS MODELOS

Se presentan tres modelos matemáticos que han sido empleados desde su formulación hasta la fecha actual,

ISSN: 2992-8338

específicamente diseñados para individuos con DMT1. Se seleccionaron dos modelos ampliamente utilizados en el control para páncreas artificial, el modelo mínimo de Bergman y el modelo de Hovorka, de acuerdo con las investigaciones de Arjanaki and Pourgholi (2020), Quiroz (2019) y Oviedo et al. (2017). También, se incluye un modelo lineal propuesto por Magdelaine et al. (2015).

4.1 Modelo Mínimo de Bergman

El modelo mínimo (Bergman et al., 1981) es el trabajo pionero de Cobelli y Bergman, su propósito era caracterizar la sensibilidad a la insulina en la salud mediante la prueba de tolerancia a la glucosa intravenosa. El modelo se divide en dos partes: la primera, aborda la desaparición de la glucosa hacia la periferia y el hígado, descrita en dos ecuaciones diferenciales (1) y (2). La segunda parte incluye una ecuación diferencial que describe la cinética de la insulina plasmática (3). Para la DMT1, se realiza una adaptación al modelo original eliminando un término de acción pancreática autorreguladora interna que es insignificante para sujetos con esta enfermedad. El modelo matemático para DMT1 está constituido por las siguientes ecuaciones, según se describe en Fisher (1991) y Flores-Martínez (2019):

$$\dot{G}(t) = -(p_1 + X(t))G(t) + p_1 G_b + D(t) \tag{1}$$

$$\dot{X}(t) = -p_2 X(t) + p_3(I(t) - I_b) \tag{2}$$

$$\dot{I}(t) = -NI(t) + \frac{U(t)}{V_I} \tag{3}$$

Donde p_1 es la tasa constante independiente de la insulina en la absorción de glucosa en los tejidos $[1/min]$, p_2 es la tasa constante que expresa la disminución espontánea de la capacidad de absorción de glucosa en los tejidos $[1/min]$, p_3 es la tasa de aumento dependiente de la insulina en la capacidad de absorción de glucosa en los tejidos $[(\mu U/mL)/min^2]$, G_b es el valor basal de la concentración de glucosa $[mg/dL]$, N es la tasa de desaparición de insulina en la sangre $[1/min]$, V_I es el volumen de distribución de la insulina $[dL]$ e I_b es el valor basal de concentración de la insulina $[\mu U/mL]$ que no es un valor natural, sino un valor objetivo para la infusión de insulina. $G(t)$ es la concentración de glucosa en la sangre $[mg/dL]$, $X(t)$ es el efecto de la insulina activa $[1/min]$ e $I(t)$ es la concentración de insulina en la sangre $[\mu U/mL]$. $D(t) = Be^{-kt}$ y $U(t) = NV_I I_b$ son las tasas de infusión exógenas de glucosa $[mg/dL/min]$ e insulina $[mU/min]$, respectivamente. B es la cantidad de carbohidratos ingeridos y k es una constante de velocidad de entrega de glucosa en sangre. La inyección de insulina se expresa en la ecuación (3) como $U(t)/V_I$, haciendo referencia a la tasa de infusión exógena de insulina por unidad de volumen.

El modelo no lineal anteriormente descrito motivó el estudio de la dinámica de insulina en el cuerpo (Quiroz, 2019). Aunque es fácil identificar sus pocos parámetros, la estimación no es tan precisa. Es sencillo de desacoplar y reensamblar ante modificaciones en el sistema, así que se ha convertido en una base para el desarrollo de otros modelos. Presenta algunas limitaciones, como la producción de glucosa es inseparable de su eliminación, considera la administración de insulina vía intravenosa, la interacción entre glucosa e insulina es simplificada y omite la producción endógena de glucosa (Chandrasekhar and Padhi, 2023).

4.2 Modelo de Hovorka

El modelo de Hovorka (Hovorka et al., 2004) está constituido por tres subsistemas: el subsistema de glucosa, que abarca los procesos de absorción, distribución y eliminación de glucosa; el subsistema de insulina, que incluye la absorción, distribución y eliminación de insulina; y el subsistema de acción de la insulina que describe la acción de la insulina en el transporte, eliminación y producción endógena de glucosa. A continuación, se presentan las ecuaciones que describen cada subsistema.

Subsistema de Glucosa

Dos compartimentos representan la cinética de la glucosa:

$$\dot{Q}_1(t) = -\left(\frac{F_{01}^c}{V_G G(t)} + x_1(t)\right) Q_1(t) + k_{12} Q_2(t) - F_R + U_G(t) + EGP_0[1 - x_3(t)] \tag{4}$$

$$\dot{Q}_2(t) = x_1(t) Q_1(t) - [k_{12} + x_2(t)] Q_2(t) G(t) \tag{5}$$

$$G(t) = Q_1(t)/V_G \tag{6}$$

Donde Q_1 y Q_2 representan las masas de glucosa en los compartimentos accesible y no accesible $[mmol]$, respectivamente. k_{12} representa la constante de velocidad de transferencia desde el compartimento no accesible al accesible $[1/min]$, V_G es el volumen de distribución del compartimento accesible $[L/kg]$, G es la concentración de glucosa (medible) $[mmol/L]$, y EGP_0 representa la producción endógena de glucosa $[mmol/kg/min]$. F_{01}^c es el flujo total de glucosa no dependiente de insulina $[mmol/kg/min]$ para la concentración de glucosa ambiental (7) y F_R es el aclaramiento renal de la glucosa por encima del umbral de glucosa de 9 $[mmol/L]$.

$$F_{01}^c = \begin{cases} F_{01} & si\ G \geq 4{,}5\ [mmol/L] \\ F_{01} G/4{,}5 & de\ lo\ contrario. \end{cases} \tag{7}$$

$$F_R = \begin{cases} 0{,}003(G - 9) V_G & si\ G \geq 9\ [mmol/L] \\ 0 & de\ lo\ contrario. \end{cases} \tag{8}$$

La absorción de glucosa intestinal $U_G(t)$ está representada por (9) donde $t_{max,G}$ es la tasa de desaparición máxima de glucosa $[min]$, D_G cantidad de carbohidratos ingeridos, y A_G es la biodisponibilidad de carbohidratos.

ISSN: 2992-8338

$$U_G(t) = \frac{D_G A_G t e^{-t/t_{max,G}}}{t^2_{max,G}} \tag{9}$$

Subsistema de Insulina

La absorción de insulina se describe en (10 - 11) donde S_1 y S_2 son una cadena de dos compartimentos que representan la absorción de la insulina de acción corta por vía subcutánea, $u(t)$ representa la administración de insulina, y $t_{max,I}$ indica el tiempo hasta la absorción máxima de insulina $[min]$. La tasa de absorción de insulina se obtiene $U_I = S_2(t)/t_{max,I}$.

$$\dot{S}_1(t) = u(t) - \frac{S_1(t)}{t_{max,I}} \tag{10}$$

$$\dot{S}_2(t) = \frac{S_1(t)}{t_{max,I}} - \frac{S_2(t)}{t_{max,I}} \tag{11}$$

La concentración plasmática de insulina $I(t)$ es descrita en (12) donde k_e es la tasa de eliminación fraccionaria $[1/min]$ y V_I es el volumen de distribución $[L/kg]$.

$$\dot{I}(t) = \frac{U_I(t)}{V_I} - k_e I(t) \tag{12}$$

Subsistema de Acción de la Insulina
El modelo actúa sobre la cinética de la glucosa de la siguiente manera:

$$\dot{x}_1 = -k_{a1}x_1(t) + k_{b1}I(t) \tag{13}$$

$$\dot{x}_2 = -k_{a2}x_2(t) + k_{b2}I(t) \tag{14}$$

$$\dot{x}_3 = -k_{a3}x_3(t) + k_{b3}I(t) \tag{15}$$

Donde x_1, x_2 y x_3 representan los efectos (remotos) de la insulina en la distribución de glucosa, eliminación de glucosa y producción endógena de glucosa, respectivamente. k_{ai}, $i = 1, 2, 3$ representan constantes de tasa de desactivación, y k_{bi}, $i = 1, 2, 3$, representan constantes de tasa de activación $[1/min]$.

Este modelo no lineal considera el retraso de la insulina administrada vía subcutánea, describe el efecto de la producción, eliminación y distribución de la glucosa. Es considerado un modelo de mediana complejidad, así que, representa con mayor fidelidad al sistema glucosa-insulina en comparación con modelos más simples. Su complejidad se refleja al incluir muchos parámetros y estados, lo que dificulta su identificación. Algunas de sus limitaciones incluyen el tener una simple representación de la absorción de la glucosa, asumir una tasa constante de vaciamiento gástrico y no presentar variaciones en la absorción de diferentes alimentos.

4.3 Modelo de Magdelaine

Magdelaine et al. (2015) propuso un modelo lineal de segundo orden capaz de reproducir la dinámica de la glucemia y la insulina en sangre, basándose en datos clínicos. Tiene puntos de equilibrio durante la fase del ayuno y ofrece resultados únicos para cada paciente. Este modelo ha sido de interés en diversas investigaciones (Raafat et al., 2021). Aunque es capaz de describir datos clínicos a lo largo de varios días, no toma en cuenta la variabilidad intrapaciente de la insulina. El modelo consiste en una ecuación que describe la dinámica de la glucosa, esta incluye la producción endógena de glucosa k_l del hígado y la digestión de carbohidratos $[mg/dL/min]$. La tasa de absorción de glucosa consume k_b por el cerebro sin depender de la insulina $[mg/dL/min]$ y la disminución de la glucosa dependiente de insulina es $-k_{si}I(t)$ $[mg/U/min \cdot U/dL]$. La dinámica de la insulina es la relación entre la velocidad de la infusión de insulina $u(t) = (k_l - k_b)(V_i)/(k_{si} \cdot k_u)$ y la insulina en la sangre $I(t)$ $[U/dL]$. Esto es modelado por un sistema de segundo orden. Por último, para representar la dinámica de la digestión, también se utiliza un sistema de segundo orden que modela la relación entre los carbohidratos en la comida $r(t)$ y $D(t)$. La representación del modelo es:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + [B_u \ B_r]\begin{bmatrix} u(t) \\ r(t) \end{bmatrix} + E \tag{16}$$

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -k_{si} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_u^2} & -\frac{2}{T_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_r^2} & -\frac{2}{T_r} \end{bmatrix} x(t)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_u}{V_i T_u^2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_r}{V_B T_r^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_l - k_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$y = Cx(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]\, x(t) \tag{18}$$

El vector de estados es: $x(t) = \left[G(t) \ I(t) \ \dot{I}(t) \ D(t) \ \dot{D}(t)\right]^T$ T_u es el tiempo de acción de la insulina $[min]$ y T_r es el tiempo de acción de los carbohidratos $[min]$, k_u y k_r son ganancias estáticas, V_i es el volumen de distribución de la insulina $[dL]$ y V_B es el volumen de distribución de los carbohidratos $[dL]$.

Es posible identificar los parámetros V_B, V_i y k_b a partir M, que representa el peso corporal $[kg]$. El valor $V_B = 0{,}65M$, el valor $V_i = 2{,}5M$ y $k_b = 128/M$.

5. CONCLUSIÓN

A lo largo de los años, se han desarrollado diversos modelos matemáticos para describir el sistema glucosa-insulina. Los modelos orientados al desarrollo de algoritmos de control para páncreas artificial presentan diferentes características que los clasifican en diversas categorías. El

ISSN: 2992-8338

modelo mínimo de Bergman se considera un modelo de la cinética de la glucosa y de la acción de insulina, glucorregulador y farmacocinético. A pesar de las limitaciones que presenta, es un modelo ampliamente utilizado por su simplicidad y su validación extensa en pacientes reales. Por otro lado, el modelo de Magdelaine es lineal, se distingue por presentar puntos de equilibrio durante la fase de ayuno, lo cual es consistente con la realidad. Este modelo se ajusta a datos clínicos de pacientes hospitalizados y ambulatorios. A diferencia del modelo mínimo de Bergman, el de Magdelaine considera la producción endógena de glucosa. El modelo de Hovorka para DMT1 es un modelo farmacocinético de alta fidelidad que representa más fielmente al sistema glucosa-insulina. Sin embargo, es más complejo debido a la gran cantidad de ecuaciones que describen la dinámica del sistema que incluyen numerosos parámetros, lo que dificulta su identificación. A pesar de las limitaciones derivadas de la complejidad de la representación matemática del sistema glucosa-insulina, estos modelos se han empleado en numerosas investigaciones para el control de la glucosa en la sangre en individuos con DMT1.

REFERENCIAS

Arjanaki, M.G. and Pourgholi, M. (2020). Takagi-sugeno (TS) fuzzy model-basedobserver design for glucose-insulin system in diabetes type 1: An LMI APPROACH. 1–5.

Benția, D., Saceleanu, M., Marinescu, A., and Ciurea, A. (2021). Centenary of insulin discovery (1921-2021): Nicolae paulescu's original contributions. *Acta Endocrinologica (Bucharest)*, 17(3), 406.

Bergman, R.N., Phillips, L.S., Cobelli, C., et al. (1981). Physiologic evaluation of factors controlling glucose tolerance in man: measurement of insulin sensitivity and beta-cell glucose sensitivity from the response to intravenous glucose. *The Journal of clinical investigation*, 68(6), 1456–1467.

Chandrasekhar, A. and Padhi, R. (2023). Blood glucose regulation models in artificial pancreas for type-1 diabetic patients. *Journal of the Indian Institute of Science*, 1–12.

De Loza, D.A.F., Barajas, H.R., and Jaramillo, R.F. (2023). Páncreas artificial: un paso hacia la gestión eficiente de la diabetes. *Revista Digital Universitaria*, 24(5).

Fisher, M.E. (1991). A semiclosed-loop algorithm for the control of blood glucose levels in diabetics. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 38(1), 57–61.

Flores-Martínez, M.A. (2019). *Diseño de una Ley de Control Basada en Observadores Funcionales para la Regulación de Glucosa Utilizando el Enfoque Takagi-Sugeno.* Master's thesis, Cenidet.

Hovorka, R., Canonico, V., Chassin, L.J., Haueter, U., Massi-Benedetti, M., Federici, M.O., Pieber, T.R., Schaller, H.C., Schaupp, L., Vering, T., et al. (2004). Nonlinear model predictive control of glucose concentration in subjects with type 1 diabetes. *Physiological measurement*, 25(4), 905.

Hoyos, J., Villa-Tamayo, M.F., Builes-Montaño, C.E., Ramirez-Rincon, A., Godoy, J.L., Garcia-Tirado, J., and Rivadeneira, P.S. (2021). Identifiability of control-oriented glucose-insulin linear models: review and analysis. *IEEE Access*, 9, 69173–69188.

Kaçar, A., Özer, M.B., and Taşcıoğlu, Y. (2020). A novel artificial pancreas: Energy efficient valveless piezoelectric actuated closed-loop insulin pump for t1dm. *Applied Sciences*, 10(15), 5294.

Kovatchev, B. (2019). A century of diabetes technology: signals, models, and artificial pancreas control. *Trends in Endocrinology Metabolism*, 30(7), 432–444.

Magdelaine, N., Chaillous, L., Guilhem, I., Poirier, J.Y., Krempf, M., Moog, C.H., and Le Carpentier, E. (2015). A long-term model of the glucose–insulin dynamics of type 1 diabetes. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(6), 1546–1552.

Makroglou, A., Li, J., and Kuang, Y. (2006). Mathematical models and software tools for the glucose-insulin regulatory system and diabetes: an overview. *Applied numerical mathematics*, 56(3-4), 559–573.

Mehmood, S., Ahmad, I., Arif, H., Ammara, U.E., and Majeed, A. (2020). Artificial pancreas control strategies used for type 1 diabetes control and treatment: a comprehensive analysis. *Applied System Innovation*, 3(3), 31.

Nath, A., Biradar, S., Balan, A., Dey, R., and Padhi, R. (2018). Physiological models and control for type 1 diabetes mellitus: A brief review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(1), 289–294.

Oviedo, S., Vehí, J., Calm, R., and Armengol, J. (2017). A review of personalized blood glucose prediction strategies for t1dm patients. *International journal for numerical methods in biomedical engineering*, 33(6), e2833.

Ozturk, Z., Bilgil, H., and Sorgun, S. (2023). A new application of fractional glucose-insulin model and numerical solutions. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(3), 1–11.

Palumbo, P., Pepe, P., Panunzi, S., and De Gaetano, A. (2012). Time-delay model-based control of the glucose–insulin system, by means of a state observer. *European Journal of Control*, 18(6), 591–606.

Quiroz, G. (2019). The evolution of control algorithms in artificial pancreas: A historical perspective. *Annual Reviews in Control*, 48, 222–232.

Raafat, S.M., Amear, B.K.A.A., and Al-Khazraji, A. (2021). Multiple model adaptive postprandial glucose control of type 1 diabetes. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 83–91.

Wilinska, M.E. and Hovorka, R. (2008). Simulation models for in silico testing of closed-loop glucose controllers in type 1 diabetes. *Drug Discovery Today: Disease Models*, 5(4), 289–298.

Zimei, W. (2013). *Mathematical models with delays for glucose-insulin regulation and applications in artificial pancreas.* Ph.D. thesis, Sichuan University, China.

ISSN: 2992-8338

Plasma treatment on electrospun scaffolds to enhance the gentamicin controlled release for skin infections

Josselyne Transito-Medina[*]. Edna Vázquez-Vélez[**], Marilú Chávez Castillo[***], Horacio Martínez[**], Álvaro Torres-Islas[*] y Bernardo Campillo[****]

** Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, C.P.62209, México; (777) 788 1582, e-mail: josstmedina@gmail.com (J.T.-M.); e-mail: alvaro.torres@uaem.mx (A.T.-I.)*

*** Laboratorio de Espectroscopía, Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 62210, Mexico; e-mail: velez.edna@icf.unam.mx (E.V.-V.); e-mail: hm@icf.unam.mx (H.M.); email:bci@icf.unam.mx (B.C.)*

**** División Académica de Mecánica Industrial, Universidad Tecnológica Emliano Zapata del Estado de Morelos, C.P.62765, Mexico; mariluchavez@utez.edu.mx (M.C.C.)*

***** Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, México; email: bci@icf.unam.mx (B.C.)*

Abstract: Skin infections usually require oral treatments, which suffer from slow and variable absorption and organ damage due to multiple doses. Therefore, a transdermal treatment capable of administering the locally acting drug to the affected area through scaffolds capable of contributing to tissue regeneration is recommended. This work compares the use of uniaxial and coaxial polyhydroxybutyrate-polyethylene glycol electrospun microfibers as dressings for the delivery of the antibiotic gentamicin targeting skin infections. The electrospinning technique obtained the fibers. The surface of the fibers was treated with plasma at atmospheric pressure for 2 s, 5 s, and 10 s. The physical-chemical characterization of the fibers was carried out using Raman, FTIR, DRX, and SEM techniques, where an improvement in the morphology and cross-linking of the polymer chains on the surface was observed after plasma treatment. The improvement of the surface properties with plasma resulted in a more controlled release of gentamicin, with the coaxial fiber treated with 2s of plasma, where a release of 15% was observed during the first hour and was maintained over time.

Keywords: *Electrospinning, PHB, PEG, plasma, drug release.*

1. INTRODUCCIÓN

Las lesiones cutáneas pueden dar lugar a infecciones bacterianas, víricas u otros patógenos que pueden obstaculizar la regeneración y agravar la situación. Las infecciones suelen ocurrir cuando los patógenos penetran a través de cortes o heridas en la piel, y según el tipo de infección, a menudo se requiere tratamiento con antibióticos, que generalmente se aplican por vía sistémica-oral (Chua y col. 2016).

Las micro y nanofibras electrohiladas se utilizan para crear apósitos que estimulan la regeneración de tejidos y administran medicamentos, especialmente en lesiones cutáneas y musculares (Pisani y col. 2019). Los apósitos de polímeros biodegradables, como el polietilenglicol (PEG) o el polihidroxibutirato (PHB), son biocompatibles y bioabsorbibles (Ulery y col. 2011).

Las fibras poliméricas a menudo presentan limitaciones como falta de humectabilidad, poca adhesión y liberación inadecuada de medicamentos (Tabakoglu y col. 2023). Para superar esto, se ha investigado el uso de tratamientos de plasma, que mejora las propiedades de la superficie de los materiales. En sistemas de administración de fármacos, se pretende lograr una liberación controlada del medicamento (Mohammadalipour y col. 2023).

Este trabajo propone utilizar fibras de polímeros PHB/PEG como apósitos para la administración de antibióticos en infecciones de la piel y la regeneración celular de las zonas afectadas. Las propiedades superficiales y biocompatibilidad de las fibras mejorarán mediante un tratamiento con plasma.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

El polietilenglicol (PEG), el polihidroxibutirato (PHB) y el diyodometano se adquirieron de Sigma-Aldrich Chemistry. Gentamicina genérica (160 mg/2 ml). El cloroformo ($CHCl_3$) y el fosfato disódico (Na_2HPO_4) fueron grados analíticos de Meyer. El cloruro de sodio (NaCl), el cloruro de potasio (KCl) y el fosfato monopotásico (KH_2PO_4) fueron grados analíticos de Fermont. El tensioactivo utilizado se sintetizó a partir de aceite de coco (Vázquez-Vélez y col. 2022).

ISSN: 2992-8338

2.2 Electrohilado fibras PHB-PEG/Gentamicina

2.2.1 Solución de electrohilado

Se obtuvieron cristales de gentamicina (160 mg/2ml) mediante evaporación del disolvente y secado al vacío. Luego se preparó una solución de 7 ml de PEG al 2 % p/v, PHB al 8 % p/v y gentamicina al 5 % p/v. El PHB se solubilizó en 5 ml de $CHCl_3$ a 35-40° C con agitación magnética 20 min. Se solubilizó PEG en 2 ml de agua destilada, luego se añadió gentamicina y se solubilizó mediante 30s ultrasonidos. Posteriormente, ambas soluciones se mezclaron con agitación constante. Previamente, se solubilizaron 0,05 mg de tensioactivo en la solución de PHB. La solución anterior se usó para electrohilado uniaxial y para electrohilado coaxial, esta solución se colocó paralelamente a una solución de PEG-PHB (2:8) para obtener un sistema núcleo-cubierta, respectivamente.

2.2.2 Proceso de electrohilado uniaxial y coaxial

La solución polimérica se colocó en una jeringa de 5 ml con una aguja de 20 G. La placa colectora se colocó a 14 cm de la punta de la aguja, a temperatura ambiente de 26° C, utilizando un flujo de solución de 0.065 mL/h y un voltaje entre 19 y 21 kV en el proceso uniaxial.

El electrohilado coaxial se realizó con una aguja coaxial (núcleo-cubierta, 17G-22G). El flujo de los dos inyectores fue de 0,5 mL/h, utilizando un voltaje de 21 kV, a 14 cm de la aguja a la placa, con una temperatura de 30°C.

2.3 Tratamiento de plasma a presión atmosférica

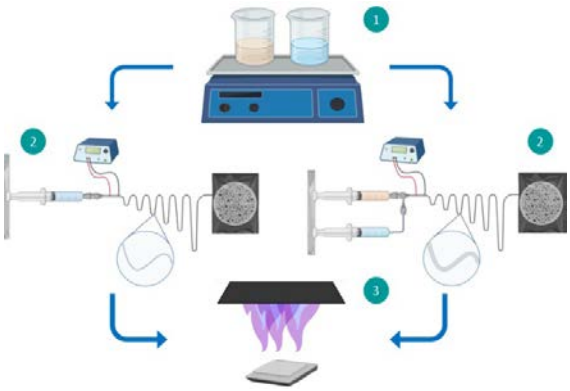


Figura 1. Metodología experimental para la obtención de microfibras uniaxial y coaxial PHB-PEG/Gentamicina.

Las fibras PHB-PEG/gentamicina se trataron con plasma a presión atmosférica (PPA). Para generar el plasma corona se utilizó un equipo Plasma APC 500 marca Diener Electronic (frecuencia: 40 kHz, potencia: aprox. 500 W, tensión de alimentación: 230 V, 50/60 Hz). Las fibras se cortaron a 2cm x 2cm y se colocaron a 4 cm de la tolva utilizando tres tiempos de tratamiento PPA (2 s, 5 s, 10 s).

En la figura 1, se esquematiza la metodología utilizada en este trabajo de investigación, la cual se enumera de la siguiente manera: 1 soluciones poliméricas PHB-PEG/gentamicina y PHB-PEG, 2 electrohilado uniaxial y coaxial, 3 tratamiento con plasma sobre las fibras.

2.4 Caracterización de las fibras

2.4.1 Ángulo de contacto y energía libre de superficie

El estudio de la humectabilidad en las microfibras con y sin tratamiento PPA se realizó mediante el método de gota sésil utilizando un microscopio digital Micro View 1000X Fotgear. Los valores de los ángulos de contacto se obtuvieron a partir del análisis geométrico utilizando el software Image J v1.4.3.x.

2.4.2 Análisis del espectrómetro de infrarrojos por transformada Raman y Fourier (FTIR)

Las microfibras de PHB-PEG/gentamicina se analizaron mediante espectroscopia Raman, utilizando el software OPUS 7.8 en un SENTERRA II Raman de Bruker acoplado a un microscopio Olympus (objetivo 20X). Se utilizó un láser con una longitud de onda de 785 nm, una potencia de 100 mW y un tiempo de adquisición de 10.000 ms en un rango de 400 a 4000 cm^2. Cada espectro se normalizó y se corrigió la línea base. La espectroscopía FT-IR se realizó en un espectrómetro FT-IR IFS 125HR de Brucker, Ettlingen, Alemania, utilizando un accesorio de reflexión total atenuada (ATR) en un rango espectral de 500 a 4500 cm^2 1 y 16 exploraciones.

2.4.3 Análisis de Difracción de Rayos X

Las microfibras de PHB-PEG/gentamicina no tratadas y tratadas con PPA se analizaron en un difractómetro de rayos X Rigaku Miniflex DMAX 2200 para conocer el grado de cristalinidad después del tratamiento PPA. La superficie de la fibra se sometió a radiación Cu-K (1,54 Å) con un monocromador de grafito en el rango 2 de 10 a 60 utilizando un haz rasante en un ángulo de un grado. El grado de cristalinidad (K) se calculó a partir de la Ecuación (1) considerando el área bajo los picos difractados:

$$\%C = \frac{Ic}{Ic + kla}\ x\ 100 \qquad (1)$$

donde %C es la fracción cristalina, Ic es el resultado de la integración de los picos de difracción, Ia es el área bajo el halo amorfo y k es la constante de proporcionalidad característica del polímero PHB (Martínez y col. 2023).

2.4.4 Análisis de morfología de las fibras PHB-PEG/Gentamicina

La morfología de la superficie de fibra PHB-PEG/gentamicina se analizó antes y después del tratamiento con plasma utilizando un microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA con un voltaje de aceleración de 5 kv. Previamente, las muestras se recubrieron con carbono en una máquina de recubrimiento por evaporación y pulverización catódica. Se utilizó el software Image J para analizar fotografías y realizar histogramas para determinar el diámetro medio de la fibra. Los histogramas se ajustaron con una distribución gaussiana para determinar el diámetro medio de la fibra.

ISSN: 2992-8338

3. RESULTADOS

3.1 Análisis RAMAN de microfibras tratadas con PPA

El espectro Raman de la microfibra PHB-PEG-gentamicina electrohilada uniaxial y coaxialmente en diferentes tiempos de tratamiento con PPA se muestra en la Figura 2, respectivamente. Cada una de las bandas corresponde a las vibraciones de los enlaces característicos de los grupos funcionales del PHB, PEG y de la gentamicina (G).

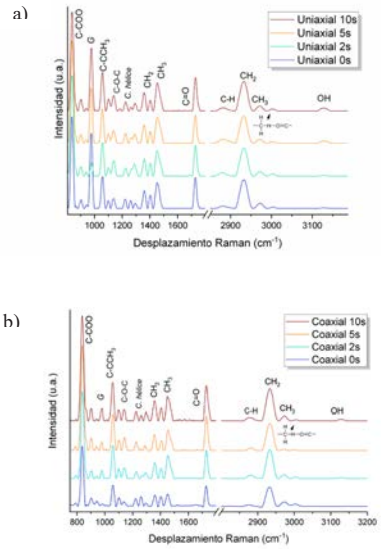


Figura 2. Espectro Raman de fibra uniaxial (a) y coaxial (b) PHB/PEG-Gentamicina.

En los espectros se observa la integridad de la molécula después del tratamiento con plasma, debido a la compatibilidad por formación de enlaces de hidrógeno entre PHB y PEG (Olkhov y col. 2015), que evita las roturas de cadena del grupo éster al ácido carboxílico. La banda vibratoria del grupo hidroxilo aumenta después de 2s de tratamiento PPA para microfibra uniaxial, indicando la inserción de grupos hidroxilo en el metileno, señal que disminuye a 2933 cm^{-1} con índices de 8.0, 6.8, 2.3 y 2. Principalmente, la banda vibratoria a 1137 cm^{-1} del enlace de vibración C-O-C aumenta en intensidad y amplitud con el tratamiento, lo que indica un posible entrecruzamiento entre cadenas poliméricas para obtener el enlace C-O-C. Para la fibra coaxial electrohilada, se observa un aumento en la señal de metileno a 2933 cm^{-1} y una disminución en la señal de metilo a 2970 cm-^{1}, en un índice de relación de 5, 7, 20 y 6 para un tiempo de tratamiento de 0, 2, 5 y 10 s respectivamente. En este caso, el entrecruzamiento está provocado por un radical metileno derivado de la ruptura del enlace C-H del grupo CH_3. La reticulación en la fibra coaxial a diferencia de la uniaxial puede deberse a que el sulfato de gentamicina no se encuentra en la superficie. Estos resultados concuerdan con estudios reportados para el tratamiento de microfibras con plasma utilizando diferentes gases, donde se ha observado la inserción de grupos polares y entrecruzamiento en la superficie (Surmenev y col. 2019). Finalmente, la polarizabilidad de la molécula en la forma cristalina se observa en el aumento de la banda de la conformación helicoidal.

3.2 Energía libre superficial en microfibras

En el tratamiento con plasma se introducen grupos polares en la superficie del polímero, así como un cambio en la rugosidad a nivel nanométrico. El valor del ángulo de contacto (AC) indica la hidrofilia de las fibras, que depende de la energía superficial, y la tensión superficial del líquido. La microfibra uniaxial PHB-PEG-gentamicina presentó un AC de 106,39° y la microfibra coaxial de 70°. En la literatura se reporta una AC de 70° para fibras PHB-PEG uniaxiales, (Domínguez-Díaz y col. 2019), concluyendo que el sulfato de gentamicina en la superficie de la microfibra uniaxial la hizo hidrofóbica. Las microfibras PHB-PEG-gentamicina se trataron con plasma para aumentar la humectabilidad de la superficie. Para ambas fibras (uniaxial y coaxial), el AC cayó a 0° después del tratamiento con plasma desde 2s de tratamiento (ver Figura 3).

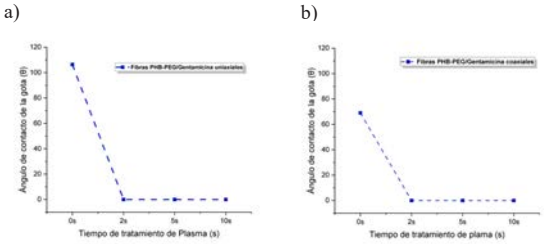


Figura 3. Humectabilidad de microfibras uniaxial (a) y coaxial (b) PHB-PEG/Gentamicina no tratadas y tratadas (2s,5s y 10s) con plasma.

3.3 Análisis FTIR de microfibras tratadas con plasma

A diferencia de la espectroscopia Raman, la espectroscopia FTIR es sensible al momento dipolar, por lo que la banda de estiramiento del enlace N-H del grupo amina en la gentamicina alrededor de 3600 cm^{-1} es observable para la fibra uniaxial y de menor intensidad en la fibra coaxial (Sato y col. 2005). La banda OH característica tampoco se observa bien debido al traslape con la banda NH; observe la Figura 4. Sin embargo, a diferencia de la espectroscopia Raman, se observa un aumento en la señal C = O del grupo éster a 1728 cm^{-1} en la microfibra uniaxial (Figura 4a). La inserción del grupo carbonilo es probablemente en la cadena de PEG (CH_2), señal de deformación que disminuye alrededor de 1300 cm^{-1} y 500 cm^{-1}.

Por otro lado, en el espectro para (Figura 4b) fibra coaxial tratada con plasma (2 s), no se observa diferencia significativa en la intensidad de las señales respecto a la fibra no tratada. Se observa sólo un ligero cambio en la amplitud de la señal correspondiente al enlace O-H y en la disminución de la señal debida a la cadena alquílica alrededor de 700 cm^{-1}, debido al entrecruzamiento inducido en la superficie de la fibra por el tratamiento con plasma.

ISSN: 2992-8338

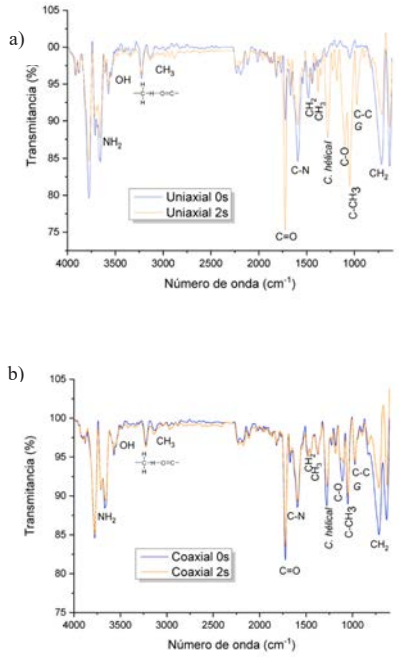


Figura 4. Espectro FTIR de fibras uniaxial (a) y coaxial (b) PHB-PEG/Gentamicina tratadas y no tratadas con plasma.

3.5 Difracción de Rayos X- Critalinidad

El pico de difracción de Bragg en 2θ = 13,4◦ corresponde al plano de difracción (0 2 0) de la forma α de PHB con los parámetros de celda: a = 0,576 nm, b = 1,32 nm y c = 0,596 nm. Los otros picos a 16°, 16,9°, 21,9°, 25,1°, 27° y 30° corresponden a difracciones en los planos (0 11), (1 1 0), (1 0 1), (1 1 1), (1 3 0) y (0 4 0), respectivamente, de la estructura octaédrica PHB. El pico a 20° 2θ del plano de difracción (0 2 1) corresponde a la forma β de PHB. Esta forma probablemente se forma durante el proceso de electrohilado debido al alargamiento de las cadenas poliméricas, lo que permite que el PHB también cristalice en la forma β. Esta forma es interesante porque permite la entrega directa de estímulos eléctricos, electroquímicos y electromecánicos a las células (Cai y col. 2019). Finalmente, el plano de difracción (1 0 5) en 23,5° 2θ corresponde al PEG, según la literatura.

El porcentaje de cristalinidad (%C) de las fibras se determinó utilizando la Ecuación (1).

Después del tratamiento con plasma el porcentaje de cristalinidad disminuye del 31% al 24% para la fibra uniaxial y del 35% al 30% para la fibra coaxial. En un estudio anterior, se informó que en películas de PHB tratadas con plasma, el %C aumentó según el tiempo de tratamiento con plasma, debido al desgaste de la parte amorfa en la superficie de la fibra (Transito-M y col. 2023). En este estudio, el tiempo de tratamiento es muy corto (2 s), por lo que no hay un desgaste significativo de la parte amorfa. Sin embargo, la unión de PHB-PEG mediante enlaces de hidrógeno se pierde tras la inserción de grupos polares, desordenando las cadenas poliméricas del cristal. Además, mediante Raman se observa una posible reticulación en la superficie de la fibra, lo que también influye en la pérdida de cristalinidad.

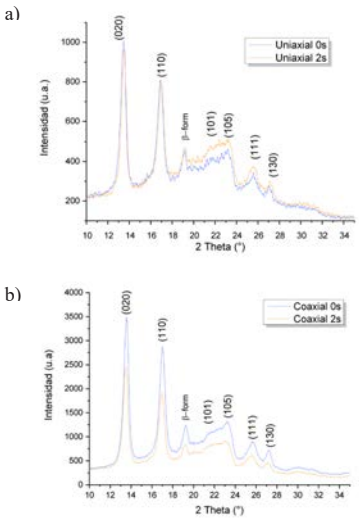


Figura 5. Difractogramas de microfibras uniaxial(a) y coaxial (b)PHB-PEG/Gentamicina (Transito-M. y col. 2023).

3.6 Microscopía SEM – Morfología

SEM analizó las fibras PHB-PEG-G para conocer el tamaño del hilo y la morfología del tejido electrohilado. En las imágenes de la Figura 6a, b, se observa la morfología del andamio de la fibra PHB-PEG-G uniaxial a una escala de 20 µm. Se realizó un histograma de la micrografía (20 µm) mediante el software Image J. Los datos se ajustaron a una distribución gaussiana para obtener un tamaño de hilo promedio de 2,56 µm. En el caso de la fibra coaxial que se muestra en las micrografías (Figura 6c, d), se observan los hilos en morfología de ondulación. El hilo de esta fibra fue de 2,58 µm, más ancho que el del electrohilado uniaxial. Aunque, las condiciones del electrohilado uniaxial y coaxial eran las mismas, se observa que la gentamicina en electrohilado uniaxial mejora la conductividad de la solución para obtener hilos bien definidos. En el caso del electrohilado coaxial, la gentamicina se encapsula en PHB-PEG, solución que presenta poca conductividad, provocando que el hilo se obtenga en rizos, como se reporta en otros estudios (Wang y col. 2021). Después del tratamiento de plasma, no se observó ningún cambio en la morfología de la fibra uniaxial (Figura 6b). Sin embargo, los hilos se dilataron en la superficie de la fibra, dando un tamaño promedio de hilo de 3 µm, más ancho que el de la fibra no tratada. Para la fibra coaxial, el tamaño del hilo aumenta con el tratamiento a 3,36 µm. El resultado más relevante es la mejora de la morfología de la fibra coaxial con el tratamiento de plasma, como se ve en la Figura 6d. La superficie de la fibra se vuelve más homogénea y los hilos rizados desaparecen para obtener una membrana porosa.

ISSN: 2992-8338

Aunque los hilos de la fibra tienen un tamaño micrométrico, la evidencia refuerza el uso de microfibras debido a su capacidad de liberación lenta en comparación con las nanofibras, que al ser más pequeñas tienen una liberación más rápida del fármaco (Liu y col. 2017).

3.7 Liberación de gentamicina

La Figura 7 muestra que la fibra uniaxial no tratada con PPA presenta una rápida liberación de G en el medio durante las

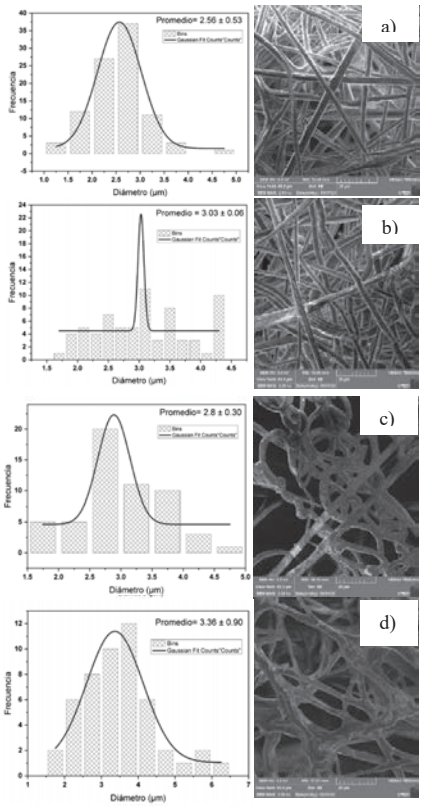


Figura 6. Imágenes SEM 20 µm fibra uniaxial sin tratamiento (a), con tratamiento 2s (b), coaxial sin tratamiento (c) y con tratamiento 2s (d), (Transito-M. y col. 2023).

primeras 5 h. La liberación de G se produce de forma sostenible en la fibra tratada con PPA hasta las 18 h.

Para la microfibra coaxial, se espera una liberación más lenta que para la fibra uniaxial. Sin embargo, como podemos ver en la Figura 7, el % de liberación de gentamicina en la microfibra coaxial fue demasiado rápido en la primera hora, llegando al 58%, y en la uniaxial fue del 38%. La rápida liberación se debe a la morfología de la microfibra coaxial, que no presenta un andamiaje uniforme. Sin embargo, al tratarse con plasma la morfología mejoró y el % de liberación en la primera hora fue del 15%, lo que posteriormente se mantuvo en el tiempo. Estos datos experimentales fueron ajustados al modelo de Korsmeyer–Peppas, obteniendo una n= 0.3. Con base a este modelo, el mecanismo de liberación es más por difusión que por el control de la membrana polimérica (Transito-M. y col. 2023).

4. CONCLUSIONES

El tratamiento con plasma atmosférico sobre microfibras PHB-PEG-gentamicina mejoró la humectabilidad y propiedades de energía superficial debido a la inserción de grupos polares observados por espectroscopía Raman y FTIR.

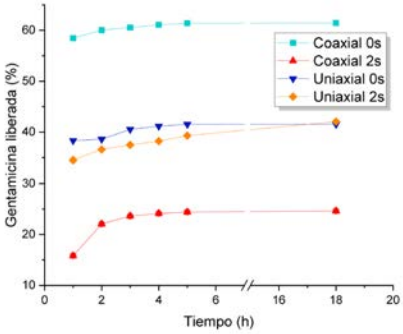


Figura 7. Liberación de Gentamicina con microfibras uniaxiales y coaxiales tratadas y no tratadas con PPA.

Este hecho implica una mejora en la adhesión celular y, en consecuencia, en la regeneración cutánea.

La inserción de grupos polares y un posible entrecruzamiento observado en la superficie de la microfibra disminuyendo hasta en un 7% la cristalinidad de la fibra uniaxial tratada con plasma. Esto es favorable en la aplicación de apósitos porque es un material más elástico y menos cristalino.

La reticulación y la mejora de la morfología en la superficie de la microfibra después del tratamiento con plasma (2 s) tuvieron un impacto favorable en la liberación del fármaco. Dando como resultado que la fibra coaxial sin tratamiento con plasma liberó 58% en la primera hora, mientras que la tratada con plasma liberó el 15% de antibiótico y se mantuvo en el tiempo.

REFERENCIAS

Cai, Z., Ping, X., He, S., & Zhu, C. (2019). Improved piezoelectric performances of highly orientated poly(B-hydroxybutyrate) electrospun nanofiber membrane scaffold blended with multiwalled carbon nanotubes. Materials Letters, 240, 213-216. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.01.010

Chua, A. W. C., Khoo, Y. C., Tan, B. K., Tan, K. C., Foo, C. L., & Chong, S. J. (2016). Skin tissue Engineering Advances in Severe Burns: review and therapeutic applications. Burns & Trauma, 4. https://doi.org/10.1186/s41038-016-0027-y

Domínguez-Díaz, M., Escorcia-García, J., & Martínez, H. (2019). Influence of the crystalline structure stability in the wettability of poly-B-hydroxybutyrate:polyethylene glycol 6000 fiber mats treated by atmospheric-pressure plasma. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 447, 84-91. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.041

ISSN: 2992-8338

Martínez, H., Vázquez-Vélez, E., Galván-Hernández, A., Radilla-Bello, J., Xosocotla, O., & Meza, A. (2023). Atmospheric plasma treatment to improve the surface properties of P3HB coating. A study of the influence of substrate roughness. Journal of Applied Polymer Science, 140(39). https://doi.org/10.1002/app.54449

Mohammadalipour, M., Asadolahi, M., Mohammadalipour, Z., Behzad, T., & Karbasi, S. (2023). Plasma surface modification of electrospun polyhydroxybutyrate (PHB) nanofibers to investigate their performance in bone tissue engineering. International Journal of Biological Macromolecules, 230, 123167. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123167

Olkhov, A. A., Гольдштрах, М. А., Ищенко, А. А., & Иорданский, А. Л. (2015). Formation of complexes in polyhydroxybutyrate–polyethylene glycol mixtures. Russian Journal of Physical Chemistry B, 9(6), 961-970. https://doi.org/10.1134/s1990793115060093

Pisani, S., Dorati, R., Chiesa, E., Genta, I., Modena, T., Bruni, G., Grisoli, P., & Conti, B. (2019). Release profile of gentamicin sulfate from Polylactide-co-Polycaprolactone electrospun nanofiber matrices. Pharmaceutics, 11(4), 161. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11040161

Sato, H., Dybal, J., Murakami, R., Noda, I., & Ozaki, Y. (2005). Infrared and Raman spectroscopy and quantum chemistry calculation studies of C–H···O hydrogen bondings and thermal behavior of biodegradable polyhydroxyalkanoate. Journal of Molecular Structure, 744-747, 35-46. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2004.10.069

Surmenev, R. A., Chernozem, R. V., Syromotina, D. S., Oehr, C., Baumbach, T., Krause, B., Boyandin, A. N., Dvoinina, L. M., Volova, T. G., & Surmeneva, M. A. (2019). Low-temperature argon and ammonia plasma treatment of poly-3-hydroxybutyrate films: surface topography and chemistry changes affect fibroblast cells in vitro. European Polymer Journal, 112, 137-145. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.12.040

Tabakoglu, S., Kołbuk, D., & Sajkiewicz, P. (2023). Multifluid electrospinning for multi-drug delivery systems: pros and cons, challenges, and future directions. Biomaterials Science, 11(1), 37-61. https://doi.org/10.1039/d2bm01513g

Transito-Medina, J., Vázquez-Vélez, E., Castillo, M. C., Martínez, H., & Campillo, B. (2023). Gentamicin Release Study in Uniaxial and Coaxial Polyhydroxybutyrate–Polyethylene Glycol–Gentamicin Microfibers Treated with Atmospheric Plasma. Polymers, 15(19), 3889. MDPI AG. Retrieved from http://dx.doi.org/10.3390/polym15193889

Ulery, B. D., Nair, L. S., & Laurencin, C. T. (2011). Biomedical applications of biodegradable polymers. Journal of Polymer Science Part B, 49(12), 832-864. https://doi.org/10.1002/polb.22259

Vázquez-Vélez, E., Martínez, H., Kesarla, M. K., & Ochoa-Leyva, A. (2022). Studies on the effect of long-chain and head groups of nonionic surfactants synthesized from palm and coconut oil on the formation of silver nanoparticles. Journal of Surfactants and Detergents, 25(3), 413-426. https://doi.org/10.1002/jsde.12582

Wang, X., Yu, G., Zhang, J., Yu, M., Ramakrishna, S., & Long, Y. (2021). Conductive polymer ultrafine fibers via electrospinning: preparation, physical properties and applications. Progress in Materials Science, 115, 100704. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100704

ISSN: 2992-8338

Saturation function with a fractional approach for enhancing the quality of biomedical images.

J.D. Pereyra-Guzmán, * **J.E. Solís-Pérez,** **
D. Hernández-Castañeda, * **J. F. Gómez-Aguilar** ***

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: d17ce064@cenidet.tecnm.mx, daniela.hc@cenidet.tecnm.mx).*
** *Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, C.P. 76230, Juriquilla, Querétaro, México. (e-mail: jsolisp@unam.mx).*
*** *CONAHCyT - Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: jose.ga@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract:
This article presents a methodology for enhancing image quality using fractional directional gradients in the Caputo-Fabrizio sense. This approach does not involve preprocessing and post-processing stages, which implies faster processing with lower execution time and reduced computational resources compared to other methodologies documented in the literature.
The results were evaluated both visually and quantitatively, based on metrics including entropy (H), structural similarity (SSIM), enhancement by entropy (EMEE), and spatial image quality without reference (BRISQUE). Unlike other proposals, the performance of the proposed methodology for digital images is deemed satisfactory. This methodology is also applied to biomedical images, yielding favorable results both visually and quantitatively.

Keywords: Biomedical image processing, saturation function, quality enhancement.

1. INTRODUCCIÓN

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar luminosidad, bordes, texturas y contraste a través de algoritmos que consisten en la adecuada interpretación de la información en las imágenes (Sridevi y Srinivas Kumar, 2019). El procesamiento de imágenes a color involucra el procesamiento de información de luminancia, colores y saturación para obtener detalles nítidos así como un efecto visual sin distorsiones. Las técnicas de mejora de la calidad tienen diversas aplicaciones. Por ejemplo, imágenes de teledetección, imágenes generales e imágenes de naturaleza biomédica (Bhatt et al., 2012).

El objetivo de las imágenes de carácter biomédico es visualizar características específicas que ayuden a interpretar un diagnóstico certero, por lo que es necesario modificar dichos atributos tomando en cuenta que, por su naturaleza y los métodos de adquisición, este tipo de imágenes tienen ruido y por consiguiente su calidad se vea degrada.

Por ejemplo, (Parot et al., 2012) utilizó la transformada fraccionaria de Fourier para analizar y reconstruir imágenes médicas. Esta técnica reconstruye las distorsiones inducidas por campos cuadráticos para mejorar la calidad de la imagen final. Esta metodología requiere etapa de post-procesamiento lo que la hace extensa.

Por otro lado, existen metodologías que utilizan filtros de Gabor. Por ejemplo, (Shams et al., 2023) emplea una variante del filtro de Gabor llamada filtro logarítmico de Gabor que se utiliza principalmente para el mejoramiento de características en imágenes digitales partiendo de la segmentación de la imagen y finalmente ajustando el contraste a partir de un umbral. Esto permite obtener resultados aceptables. Su principal desventaja es que requiere mayor costo computacional en contraste con la técnica que utiliza la transformada fraccionaria de Fourier.

La ecualización por histograma adaptable y redes neuronales convolucionales profundas son técnicas utilizadas en el procesamiento de imágenes médicas para la detección de masas y micro calcificaciones (Alshamrani et al., 2022). Al mejorar el contraste de las imágenes entre el fondo y el tejido fibroso es posible distinguir entre varios tipos de tejidos. Sin embargo, su desventaja está en que al incluir etapas como preprocesamiento y postprocesamiento amplían la metodología y por consecuencia requieren mayor costo computacional.

ISSN: 2992-8338

2. PRELIMINARES MATEMATICOS

2.1 Derivada fraccionaria de Caputo-Fabrizio

La derivada fraccionaria de Caputo-Fabrizio (CF) es una extensión del concepto de derivada de orden no entero desarrollado por los matemáticos Michele Caputo y Mauro Fabrizio. Esta derivada tiene una propiedad importante llamada condiciones iniciales no locales y posee un kernel exponencial. Estas condiciones hacen que la derivada de Caputo-Fabrizio sea adecuada para describir sistemas que muestran memoria a largo plazo y comportamientos complejos. También es utilizada en una variedad de aplicaciones, incluyendo la modelación de fenómenos físicos, la teoría de control y la resolución de ecuaciones diferenciales fraccionarias.

Entonces, definimos la derivada fraccionaria de (Caputo y Fabrizio, 2015) como sigue

$$\left({}^{CFC}_{a}D^{\alpha}_{b}\right)x(t)=\frac{M(\alpha)}{1-\alpha}\int_{a}^{b}\frac{d^{n}}{dt^{n}}(x(\tau))\,exp\left[-\frac{\alpha}{1-\alpha}(t-\tau)\right]d\tau, \quad (1)$$

donde, $M(\alpha)$ es una función de normalización tal que

$$M(0)=M(1)=1. \quad (2)$$

Además, $\alpha\in[0,1)$. Utilizando (1), definimos los gradientes direccionales como sigue

$${}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{x}=\begin{bmatrix}{}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_0 & 0 & {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_2\\ {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_7 & 0 & {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_3\\ {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_6 & 0 & {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_4\end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{y}=\begin{bmatrix}{}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_0 & {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_1 & {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_2\\ 0 & 0 & 0\\ {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_6 & {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_5 & {}^{CF}\mathcal{D}^{\alpha}_{x}\cdot a_4\end{bmatrix}, \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned}a_0&=f(x-1,y-1),\\ a_1&=f(x,y-1),\\ a_2&=f(x+1,y-1),\\ a_3&=f(x+1,y),\\ a_4&=f(x+1,y+1),\\ a_5&=f(x,y+1),\\ a_6&=f(x-1,y+1),\\ a_7&=f(x-1,y).\end{aligned} \quad (5)$$

La ecuación (3) representa el gradiente a lo largo de x mientras que la ecuación (4) el gradiente a lo largo de y. Por otro lado, al contar con direcciones vertical y horizontal, también se puede expresar una dirección arbitraria, como la descrita en la ecuación (6) (Lavín-Delgado et al., 2020).

$${}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{\theta}=\cos(\theta)\cdot{}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{x}+\sin(\theta)\cdot{}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{y}. \quad (6)$$

2.2 Función de saturación

La función de saturación utilizada en esta propuesta para mejorar la calidad en imágenes digitales, fue propuesta por (Chen et al., 2012). Dicha función está dada como sigue

$$\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)=\mathrm{sat}\left(\max\left\{\mathcal{G}^{\alpha}_{d}(x,y)\right\}\mid d\in\Omega\right), \quad (7)$$

donde $\Omega:=\left\{{}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{x},{}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{y},{}^{CF}\mathcal{G}^{\alpha}_{\theta}\right\}$ mientras que $\mathrm{sat}(u)$ se define como

$$\mathrm{sat}(u)=\begin{cases}0, & u<0,\\ u, & u\in[0,255],\\ 255, & u>255.\end{cases} \quad (8)$$

La función (8) satura los pixeles de la imagen a partir de un conjunto de gradientes representados en Ω para obtener características de interés particular.

3. METODOLOGÍA

El modelo de color RGB, permite representar una imagen mediante combinaciones de colores rojo, verde y azul. Estos componentes están fuertemente acoplados, lo que implica que cambios en un canal afectan significativamente a los otros canales. El modelo Lab, se basa en tres componentes: L (luminosidad), a (tonalidad verde-rojo), y b (tonalidad azul-amarillo). Este cambio proporciona una representación más perceptual y consistente con la forma en que percibimos los colores (Lukac y Plataniotis, 2018; Chen et al., 2012).

Existen diferencias entre ambos modelos, mencionando algunas de ellas podemos destacar:

- Percepción Humana: El modelo Lab está diseñado para reflejar mejor cómo percibimos los colores. La componente L representa la luminosidad, mientras que a y b capturan las diferencias en tonalidades. En RGB, las variaciones en los componentes no siempre coinciden con cambios perceptuales en el color.
- Independencia de Canales: En Lab, los canales L, a y b son más independientes entre sí en comparación con RGB. Esto facilita realizar operaciones específicas, como ajustes de brillo y contraste, sin afectar excesivamente los otros componentes.
- Uniformidad de Color: Lab busca lograr uniformidad perceptual, es decir, distancias iguales en el espacio Lab corresponden a cambios perceptuales similares. En RGB, distancias iguales no siempre se traducen en cambios de color uniformes.

Esta transformación es valiosa para aplicaciones como la corrección de color, análisis de imagen y procesamiento de imágenes médicas, ya que el modelo Lab se alinea mejor con la percepción humana del color (de l'Eclairage, 1978; Schwarz et al., 1987; Wyszecki y Stiles, 2000).

La metodología propuesta para mejorar la calidad en imágenes digitales se muestra en la Figura 1 y considera la derivada de Caputo-Fabrizio para obtener los gradientes direccionales. En este diagrama a bloques, se aprecia que los gradientes direccionales son saturados para obtener las mejores características. Posteriormente, se suma la imagen original y finalmente, transformamos el modelo de color Lab procesado de nuevo al modelo de color RGB.

ISSN: 2992-8338

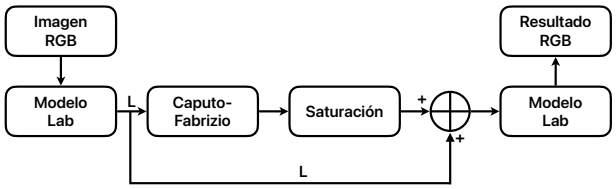


Fig. 1. Metodología para mejoramiento de imágenes utilizando función de saturación.

Como se observa en la Fig. 1, la metodología propuesta con el modelo *Lab*, no utiliza etapa de preprocesamiento y posprocesamiento. Partimos del hecho de que las derivadas fraccionarias son consideradas filtros artificiales y por consiguiente, los gradientes direccionales son robustos ante la presencia de ruido.

Además, al considerar que los gradientes fraccionarios dependen de un orden no entero y que este es desconocido, es necesario establecer una estrategia que permita encontrar el orden particular para cada imagen. Por esta razón, se considera que encontrar el orden óptimo de los gradientes conlleva a un problema de optimización, en donde se requiere minimizar la siguiente función objetivo

$$\min_{\alpha} \frac{255^2}{10^{\frac{\mathrm{PSNR_{RGB}}}{10}}}, \tag{9}$$

sujeto a la siguiente restricción

$$\alpha \in (0,1), \tag{10}$$

donde $\mathrm{PSNR_{RGB}}$ es la relación señal-ruido.

El PSNR nos permite conocer cuánto se ha degradado una imagen, por lo que es deseable obtener un valor numérico alto (Vidya et al., 2009). Por esta razón, se puede considerar al PSNR como una métrica de evaluación (E Woods y C Gonzalez, 2008; Szeliski, 2022; Tanchenko, 2014; Sonka et al., 2013; Gupta et al., 2011; Hore y Ziou, 2010; Javaheri et al., 2020; Navas et al., 2011).

$$\mathrm{PSNR_{RGB}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\mathrm{MAX}^2}{MSE}\right), \tag{11}$$

donde MAX es el valor máximo que un píxel puede alcanzar por canal en el contexto de imágenes RGB y MSE esta dado por la siguiente ecuación

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left((R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2\right), \tag{12}$$

aquí N denota el número total de píxeles en la imagen, R_1, G_1 y B_1 son los valores de los canales rojo, verde y azul de la imagen original mientras que R_2, G_2 y B_2 son los valores de los canales rojo, verde y azul de la imagen de referencia.

El algoritmo de Recocido Simulado (SA) pertenece a los algoritmos de búsqueda metaheurísticos inspirado en el proceso de recocido del acero y la cerámica. Este algoritmo consiste en calentar un material para moldearlo a voluntad. Posteriormente se enfría lentamente de modo que su temperatura sea adecuada al proceso, puesto que si el material se enfría demasiado rápido puede causar deformaciones que interfieren con el objetivo deseado (Dréo et al., 2006).

El algoritmo de SA emplea una etapa de aleatoriedad y evaluación del resultado, en donde el cambio propuesto se acepta, siempre y cuando mejore la optimización. Por otro lado, si el movimiento afecta de manera negativa podrá ser aceptado, pero con una probabilidad baja. El proceso de aleatorización está controlado por un parámetro que está análogamente relacionado con la temperatura del proceso del cual se inspira. Dicha temperatura se estará reduciendo en consecuencia al tiempo de simulación para permitir una menor cantidad de soluciones negativas, de modo que la solución final mejorará poco a poco (Rojas Álvarez, 2021).

4. MÉTRICAS DE VALIDACIÓN

Una vez procesada la imagen original y visualizados los resultados obtenidos, se propone medir su desempeño. Para ello existen diferentes métricas empleadas para cuantificar características de una imagen resultante de un algoritmo de procesamiento de imágenes en comparación con la imagen original.

La primer métrica utilizada es la entropía (H). Dicha métrica proporciona un valor numérico donde el resultado al ser un valor alto significa que el esquema de mejora de calidad es la que genera mayor información (Yu et al., 2017). Su representación está dada por la siguiente ecuación

$$H = -\sum_{k} p_k \log_2(p_k), \tag{13}$$

donde k es el número de niveles de gris, p_k es la probabilidad asociada al nivel de gris k.

El índice de similitud estructural (SSIM) (Wang et al., 2004) tiene un valor entre $[0, 1]$. Si el valor de SSIM es igual a 1, entonces significa que tienen exactamente los mismos valores tanto en la imagen original como en la imagen procesada. La expresión que denota al SSIM está dada como sigue

$$\mathrm{SSIM}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \tag{14}$$

donde μ_x y μ_y son el promedio de x e y, respectivamente, σ_x^2 y σ_y^2 son la varianza de x e y, respectivamente, σ_{xy} es la covarianza de x e y y $C_1 = (0.01L)^2$, $C_2 = (0.03L)^2$ son números constantes para estabilizar la ecuación. La medida de mejora por entropía (EMEE) (Agaian et al., 2001), es una métrica más sensible al cambio en contraste con respecto a otras. Un valor alto indica un contraste mayor en la imagen de referencia con respecto a la imagen resultante. EMEE se define por

ISSN: 2992-8338

$$\text{EMEE} = \frac{1}{L^2}\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{L}\lambda\left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right)^{\lambda} ln\left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right), f_{min} > 0, \quad (15)$$

donde L es el número de bloques, $0 < \lambda < 1$ es una constante, f_{max} y f_{min} son los valores máximo y mínimo de los píxeles en cada bloque. Por último, la métrica para evaluar la calidad espacial de imagen ciego/sin referencia (BRISQUE) (Mittal et al., 2011), es un modelo basado en estadísticas naturales. Mientras el valor numérico de BRISQUE sea de menor puntuación indica una mejor calidad de perspectiva con respecto a la imagen original. Esta métrica está dada como sigue

$$\text{BRISQUE} = \mathbf{w}^T\mathbf{F}, \quad (16)$$

donde $\mathbf{w}$ es un vector de coeficientes y $\mathbf{F}$ es un vector de características extraídas de la imagen.

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La metodología propuesta por (Zhang y Dai, 2022) consta de 3 etapas. En la primera, se realiza el preprocesamiento, que implica el cálculo del histograma de la imagen original, suavizado con el kernel Gaussiano, medición de la rugosidad y determinación del nivel de gris de agrupamiento. Posteriormente, se lleva a cabo la etapa de procesamiento mediante la transformada de Fourier en 2D. Finalmente, se realiza un posprocesamiento centrado en el mejoramiento de la imagen para detalles finos a través del cálculo de la entropía de la imagen. Por otro lado la metodología propuesta por (Chen et al., 2012),utiliza la derivada fraccionaria de Riemann-Liouville, para calcular el gradiente en 8 direcciones posibles. Posteriormente, utiliza una función de saturación que permite obtener los mejores valores para cada dirección. Cabe mencionar que esta propuesta calcula el orden de la derivada de forma empírica.

Las Figuras 2 - 4 fueron obtenidas de la base de datos USC-SIPI "Aerials", (University of Southern California, 1981). De izquierda a derecha se muestra la imagen original, la imagen propuesta por (Zhang y Dai, 2022), y la metodología presentada en la Fig. 1.

(a) Original (b) Zhang y Dai (2022) (c) $\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)

Fig. 2. Imagen "2.1.01". Imagen original (Izquierda), Imagen propuesta por Zhang y Dai (2022) (Centro), Función de saturación con gradiente fraccionario (Derecha).

(a) Original (b) Zhang y Dai (2022) (c) $\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)

Fig. 3. Imagen "2.1.02". Imagen original (Izquierda), Imagen propuesta por Zhang y Dai (2022) (Centro), Función de saturación con gradiente fraccionario (Derecha).

(a) Original (b) Zhang y Dai (2022) (c) $\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)

Fig. 4. Imagen "2.1.03". Imagen original (Izquierda), Imagen propuesta por Zhang y Dai (2022) (Centro), Función de saturación con gradiente fraccionario (Derecha).

En contraste con los resultados obtenidos por (Zhang y Dai, 2022), en esta propuesta se aprecia la mejora de textura, contraste y saturación, sin perder información.

Las Tablas 1-5 muestran las métricas (13)-(16) aplicadas a diferentes metodologías reportadas en la literatura. De estos resultados destaca la metodología propuesta por (Zhang y Dai, 2022), así como por la propuesta de este artículo (7).

Table 1. Comparativa de la métrica de Entropía.

Image	Imagen Original	Chen et al. (2012)	Zhang y Dai (2022)	$\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)
2.1.01	7.1953	***7.4801***	7.0126	7.4705
2.1.02	7.1957	***7.5231***	7.4305	7.3858
2.1.03	5.7432	6.1488	6.1326	***6.9427***

Table 2. Comparativa de la métrica de PSNR.

Imagen	Chen et al. (2012)	Zhang y Dai (2022)	$\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)
2.1.01	16.9118	16.3130	***27.6729***
2.1.02	17.6716	***29.8310***	26.6389
2.1.03	24.4056	26.0449	***27.7597***

Table 3. Comparativa de la métrica de SSIM.

Imagen	Chen et al. (2012)	Zhang y Dai (2022)	$\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)
2.1.01	0.6338	0.9191	***0.9604***
2.1.02	0.7048	***0.9840***	0.9600
2.1.03	0.7859	***0.9589***	0.9559

ISSN: 2992-8338

Table 4. Comparativa de la métrica de EMEE.

Imagen	Chen et al. (2012)	Zhang y Dai (2022)	$\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)
2.1.01	1.6667	***1.6917***	1.2960
2.1.02	***2.6192***	1.2085	1.2694
2.1.03	***6.8302***	2.1350	1.4582

Table 5. Comparativa de la métrica de BRISQUE.

Imagen	Chen et al. (2012)	Zhang y Dai (2022)	$\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)
2.1.01	45.3041	***30.0843***	32.5064
2.1.02	44.5253	***41.2102***	42.7081
2.1.03	39.8493	17.4546	***10.0206***

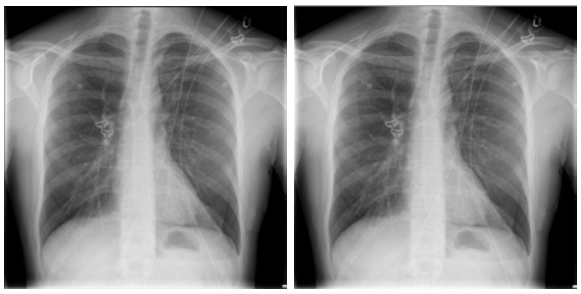
En las tablas anteriormente mencionadas, se resalta el mejor valor de la métrica en cuestión para cada imagen. Se observa que los resultados utilizando la metodología propuesta en este trabajo no presentan perdida de información, estructura, así como calidad de perspectiva en contraste con metodologías reportadas en la literatura.

A continuación en la Tabla 6 se observan los tiempos computacionales para las imágenes 2-4. Las pruebas se realizaron en una MacBook 2020 con procesador M1 y 8 GB de RAM, realizando $10,000$ simulaciones por imagen para obtener medias y desviaciones estándar.

Table 6. Análisis de tiempos computacionales.

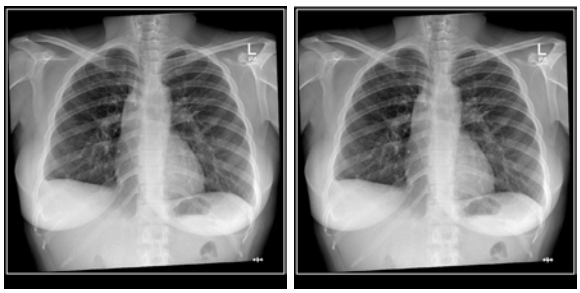
Imagen	Tiempo en segundos
2.1.01	1.4371 ± 0.0725
2.1.02	1.2644 ± 0.0419
2.1.03	1.2478 ± 0.0755

La imagenología médica es un complemento importante en el área de la salud ya que permite a los profesionales proponer un diagnóstico eficiente a los pacientes. En este trabajo se proponen mejorar las características de interés de imágenes médicas como parte del proceso de validación de la metodología. En las Figuras 5-6 se muestran los resultados visuales de imágenes médicas de pacientes con diferentes diagnósticos. Estas imágenes tienen características únicas en el área de los pulmones y tórax por lo que es necesario hacer una comparativa con la imagen original.



(a) Original (b) $\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)

Fig. 5. Imagen "Pneumothorax". (a) Imagen original, (b) Función de saturación con gradiente fraccionario.



(a) Original (b) $\mathcal{H}^{\alpha}(x,y)$ (7)

Fig. 6. Imagen "subpulmonic". (a) Imagen original, (b) Función de saturación con gradiente fraccionario.

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos al aplicar las métricas (13)-(16) a las Figs- 5 y 6.

Table 7. Métricas obtenidas de las imágenes médicas.

Métricas	Pneumothorax	Subpulmonic
Entropía Original	7.5133	7.1103
Entropía Procesada	7.5858	7.0782
PSNR	40.9502	34.6896
SSIM	0.9899	0.9864
EMEE	0.6454	0.5752
BRISQUE	29.3443	37.6128

6. CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo de investigación permitió obtener resultados aceptables al momento de contrastar con algunas metodologías reportadas en la literatura. Se observa que, en comparación con otras investigaciones, esta metodología propuesta no requiere de las etapas de preprocesamiento y postprocesamiento.

Por otro lado, el orden fraccionario de los gradientes direccionales, permite resaltar tanto bordes y texturas en la imagen de interés. Esto ofrece a los lectores un gradiente adaptable a las condiciones de la imagen de entrada.

De manera visual se aprecian mejoras en contraste, luminosidad y saturación. Además, al ser evaluada por las métricas SSIM, EMEE y BRISQUE, se puede concluir que los resultados no solo son aceptables visualmente sino también cuantitativamente. De acuerdo con los resultados obtenidos, esta propuesta se desempeñó mejor que las metodologías reportadas en la literatura.

El bajo costo computacional de los gradientes direccionales y la función de saturación, ofrece una alternativa adaptable a los lectores. Abriendo la posibilidad de implementar esta metodología en otras áreas de la ciencia e ingeniería como pueden ser visión por computadora y tareas de segmentación.

AGRADECIMIENTOS

Jonathan Diego Pereyra Guzmán agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de su beca de doctorado. José Francisco Gómez Aguilar agradecen el apoyo brindado por el CONAHCyT: Cátedras

ISSN: 2992-8338

CONAHCyT para jóvenes investigadores 2014. Jesús Emmanuel Solís Pérez y José Francisco Gómez Aguilar agradecen el apoyo del SNII-CONAHCyT.

Jesús Emmanuel Solís Pérez agradece a PAPIIT-DGAPA, UNAM, por los recursos computacionales proporcionados a través del proyecto TA100223.

REFERENCES

Agaian, S.S., Panetta, K., y Grigoryan, A.M. (2001). Transform-based image enhancement algorithms with performance measure. *IEEE Transactions on image processing*, 10(3), 367–382.

Alshamrani, K., Alshamrani, H.A., Alqahtani, F.F., y Almutairi, B.S. (2022). Enhancement of mammographic images using histogram-based techniques for their classification using cnn. *Sensors*, 23(1), 235.

Bhatt, P., Shah, A., Patel, S., y Patel, S. (2012). Image enhancement using various interpolation methods. *International Journal of Computer Science and Information Technology & Security*, 2(4).

Caputo, M. y Fabrizio, M. (2015). A new definition of fractional derivative without singular kernel. *Progress in Fractional Differentiation & Applications*, 1(2), 73–85.

Chen, D., Chen, Y., y Xue, D. (2012). 1-d and 2-d digital fractional-order savitzky–golay differentiator. *Signal, Image and Video Processing*, 6, 503–511.

de I'Eclairage, C.I. (1978). Recommendations on uniform color spaces-color difference equations, psyhometric color terms. supplement no. 2 to cie publication no. 15 (e.-1.3. 1) 1971. *TC*, 1.

Dréo, J., Pétrowski, A., Siarry, P., y Taillard, E. (2006). *Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies*. Springer Science & Business Media.

E Woods, R. y C Gonzalez, R. (2008). Digital image processing.

Gupta, P., Srivastava, P., Bhardwaj, S., y Bhateja, V. (2011). A modified psnr metric based on hvs for quality assessment of color images. In *2011 International Conference on Communication and Industrial Application*, 1–4. IEEE.

Hore, A. y Ziou, D. (2010). Image quality metrics: Psnr vs. ssim. In *2010 20th international conference on pattern recognition*, 2366–2369. IEEE.

Javaheri, A., Brites, C., Pereira, F., y Ascenso, J. (2020). Improving psnr-based quality metrics performance for point cloud geometry. In *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 3438–3442. IEEE.

Lavín-Delgado, J., Solís-Pérez, J., Gómez-Aguilar, J.F., y Escobar-Jiménez, R.F. (2020). A new fractional-order mask for image edge detection based on caputo–fabrizio fractional-order derivative without singular kernel. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 39, 1419–1448.

Lukac, R. y Plataniotis, K.N. (2018). *Color image processing: methods and applications*. CRC press.

Mittal, A., Moorthy, A.K., y Bovik, A.C. (2011). Blind/referenceless image spatial quality evaluator. In *2011 conference record of the forty fifth asilomar conference on signals, systems and computers (ASILOMAR)*, 723–727. IEEE.

Navas, K., Gayathri, D.K., Athulya, M., y Vasudev, A. (2011). Mwpsnr: A new image fidelity metric. In *2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems*, 627–632. IEEE.

Parot, V., Sing-Long, C., Lizama, C., Tejos, C., Uribe, S., y Irarrazaval, P. (2012). Application of the fractional fourier transform to image reconstruction in mri. *Magnetic resonance in medicine*, 68(1), 17–29.

Rojas Álvarez, J.A. (2021). Propuesta y optimización de un sistema de lógica para la predicción de rendimiento académico. *Universidad Distrital Francisco José de caldas*, 77.

Schwarz, M.W., Cowan, W.B., y Beatty, J.C. (1987). An experimental comparison of rgb, yiq, lab, hsv, and opponent color models. *ACM Transactions on Graphics (tog)*, 6(2), 123–158.

Shams, H., Jan, T., Khalil, A.A., Ahmad, N., Munir, A., y Khalil, R.A. (2023). Fingerprint image enhancement using multiple filters. *PeerJ Computer Science*, 9, e1183.

Sonka, M., Hlavac, V., y Boyle, R. (2013). *Image processing, analysis and machine vision*. Springer.

Sridevi, G. y Srinivas Kumar, S. (2019). Image enhancement based on fractional calculus and genetic algorithm. In *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Data Engineering: Proceedings of ICCIDE 2018*, 197–206. Springer.

Szeliski, R. (2022). *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Nature.

Tanchenko, A. (2014). Visual-psnr measure of image quality. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 25(5), 874–878.

Vidya, P., Veni, S., y Narayanankutty, K. (2009). Performance analysis of edge detection methods on hexagonal sampling grid. *International Journal of Electronic Engineering Research*, 1(4), 313–328.

Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., y Simoncelli, E.P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4), 600–612.

Wyszecki, G. y Stiles, W.S. (2000). *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*, volume 40. John wiley & sons.

Yu, J., Tan, L., Zhou, S., Wang, L., y Siddique, M.A. (2017). Image denoising algorithm based on entropy and adaptive fractional order calculus operator. *IEEE access*, 5, 12275–12285.

Zhang, X. y Dai, L. (2022). Image enhancement based on rough set and fractional order differentiator. *Fractal and Fractional*, 6(4), 214.

ISSN: 2992-8338

Functional Observer for an H2AT System under the Takagi-Sugeno Representation

E. Dominguez-Lagunas *, **G.-L. Osorio-Gordillo** *, **A.-R. Guadarrama-Estrada** *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*
e-mail: m22ce058@cenidet.tecnm.mx

Abstract. Design of a functional observer that allows estimate a linear function of the states for an H2AT pendulum, who represents a person with spinal cord injury and contributes to a better understanding of the behavior of this kind of individuals. Based on the functional observer, a state feedback controller is designed for a system Takagi-Sugeno representation.

Keywords: Functional observer, Head-Two-Arms-Trunk (H2AT), Takagi-Sugeno, membership functions.

1. INTRODUCCIÓN

El enfoque Takagi-Sugeno(T-S) es una representación utilizada para modelar sistemas no lineales, el enfoque de sector no lineal consiste en representar mediante modelos locales lineales la dinámica que posee cada una de las no linealidades del sistema. Algunos trabajos que utilizan esta técnica son [Mátyás and Lendek (2021)] donde se diseña un observador con retardo para sistemas difusos T-S. Así mismo, en [Chiu et al. (2021a)] se desarrolló un control tolerante a fallas para sistemas no lineales descritos por sistemas T-S que satisfacen la condición de Lipschitz. Por último en [Chiu et al. (2021b)] el caso de estudio es un péndulo invertido omnidireccional, el cual es controlado con base en un esquema difuso dual T-S.

Por otro lado, un observador estima las variables de estado basándose en las mediciones de las variables de salida y de control, por ello es que los observadores pueden diseñarse si y solo si se satisface la condición de observabilidad [Ogata (2010)]. Por ello, los observadores son esenciales en el campo del control automático, ya que permiten implementar estrategias de control basadas en la retroalimentación del estado estimado del sistema. Esto con el objetivo de poder desarrollar controladores que se adapten y respondan a las condiciones del sistema.

En la literatura se pueden encuentran distintos métodos y estructuras para llevar a cabo la estimación de estados. En este artículo se presenta un observador funcional dinámico generalizado, dicho observador puede proporcionar una estimación continua de una función del sistema acorde de las mediciones disponibles que posea el observador.

Algunos trabajos que han abordado este tipo observador se muestran a continuación: en [Xie et al. (2020)], se diseño un observador-controlador funcional de sistemas T-S con variables premisas no medibles y ruido externo. En [Khadhraoui and Messaoud (2020)] se llevo a cabo el diseño un observador funcional para sistemas singulares que cuentan con un retardo. La efectividad del observador se realiza con un ejemplo numérico. Del mismo modo, en [Guadarrama-Estrada and Osorio-Gordillo (2019)] diseñó una estrategia para un observador funcional discreto, el cual es estimado para las variables de estados no medibles del sistema. El desarrollo propuesto de la metodología es evaluada en un brazo robótico de 2 GDL. Por último, en [Flores-Martínez and Osorio-Gordillo (2019)] se desarrollo el diseño de un observador funcional generalizado dinámico para sistemas T-S. El ejemplo que muestra la efectividad de lo desarrollado es un sistema de glucosa-insulina.

El control por retro alimentación de estados consiste en estabilizar el comportamiento de un sistema, mediante la medición de los estados del sistema con el único propósito de minimizar el error de regulación.

El caso de estudio que se desarrolla en este artículo es el péndulo H2AT (Heat 2 Arms and Trunk), el cual representa a una persona con lesión en la médula espinal. En [M.Blandeau and Estrada-Manzo (2016)] se presentó el sistema del péndulo H2AT mediante el enfoque de sector no lineal Takagi-Sugeno, con el objetivo de desarrollar un observador de entradas desconocidas para la estimación de las variables de estado del sistema.

La principal aportación de este artículo es proponer un esquema de control por retroalimentación de estados para estabilizar la posición vertical del péndulo H2AT, con el fin de obtener robustez ante alguna perturbación o falla abrupta del sistema, además de poder incrementar el rango de estabilidad del observador. Esto mediante el uso de un observador funcional dinámico generalizado, con

ISSN: 2992-8338

el fin de estimar una función, debido a que esta función será la ley de control capaz regular el sistema; además se utiliza el enfoque de sector no lineal Takagi-Sugeno para representar la dinámica del péndulo H2AT.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considere un sistema lineal bajo el marco de la representación T-S como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta)\left(A_i x(t)\right) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \\ z(t) &= Lx(t) \end{aligned} \tag{1}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^l$ es la entrada del sistema, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ representa las variables de salida medidas. $A_i \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times l}$, $C \in \mathbb{R}^{p\times n}$ y $L \in \mathbb{R}^{q\times n}$ son matrices conocidas, $\delta(t) \in \mathbb{R}^{\rho}$ es el vector de variables premisas, $\mu_i(\delta)$ son las funciones de ponderación y m es el número de modelos locales lineales, el cual es determinado por $m = 2^{\rho}$, siendo ρ el número de no linealidades en el sistema.

Con el objetivo de realizar el diseño del observador funcional, se asume que el sistema Takagi-Sugeno cumple con la propiedad de observabilidad funcional:

$$\mathbf{rank}\begin{bmatrix} LA_i \\ CA_i \\ C \\ L \end{bmatrix} = \mathbf{rank}\begin{bmatrix} CA_i \\ C \\ L \end{bmatrix}, \quad \forall_i = 1, ..., m \tag{2}$$

De igual forma se asume que el sistema (1) es estabilizable si:

$$\mathbf{rank}\begin{bmatrix} sL - LA_i \\ CA_i \\ C \end{bmatrix} = \mathbf{rank}\begin{bmatrix} CA_i \\ C \\ L \end{bmatrix}, \ \forall_s \in C, \ |s| \leq 1 \tag{3}$$

Se considera un observador funcional para la estimación de estados y la ley de control con estructura tipo dinámico generalizado para sistemas Takagi-Sugeno, en la Figura 1 se hace referencia al esquema de solución propuesto.

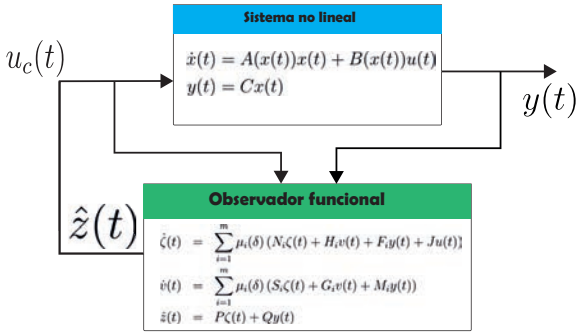


Figura 1. Esquema de control basado en el observador.

$$\dot{\zeta}(t) = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta)\left(N_i\zeta(t) + H_i v(t) + F_i y(t) + Ju(t)\right) \tag{4}$$

$$\dot{v}(t) = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta)\left(S_i\zeta(t) + G_i v(t) + M_i y(t)\right) \tag{5}$$

$$\hat{z}(t) = P\zeta(t) + Qy(t) \tag{6}$$

donde $\zeta(t) \in \mathbb{R}^{q_0}$ representa el vector de estado del observador proporcional integral, $v(t) \in \mathbb{R}^{q_1}$ es un vector auxiliar y $\hat{z}(t)$ es la función de estimación del observador. N_i, H_i, F_i, S_i, L_i, M_i, P y Q son matrices desconocidas de dimensiones apropiadas a determinar.

Tomemos en cuenta una matriz $T \in \mathbb{R}^{q_0\times n}$ para definir el vector transformado de error $\varepsilon(t)$ como la diferencia entre $\zeta(t)$ y $Tx(t)$. De esta manera, la dinámica del error de estimación se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\zeta}(t) - T\dot{x}(t) \tag{7}$$

De tal forma, la dinámica de error de estimación es expresada como:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta)[N_i\varepsilon(t) + [N_iT + F_iC - TA_i]\,x(t) \\ + H_i v(t) + [J - TB]\,u(t)] \end{aligned} \tag{8}$$

usando la definición de $\varepsilon(t)$ en las ecuaciones (5) y (6), puede ser reescritas como:

$$\dot{v}(t) = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta)[S_i\varepsilon(t) + [S_iT + M_iC]\,x(t) + G_i v(t)] \tag{9}$$

$$\hat{z}(t) = P\varepsilon(t) + [PT + QC]\,x(t) \tag{10}$$

Suponiendo que las siguientes condiciones se cumplen

$a)$ $N_iT + F_iC - TA_i = 0$ $\quad b)$ $J = TB$
$c)$ $S_iT + M_iC = 0$ $\quad d)$ $PT + QC = L$

Por lo que, la dinámica de error de estimación formada por las ecuaciones (8) y (9) se reescribe como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta) \underbrace{\begin{bmatrix} N_i & H_i \\ S_i & G_i \end{bmatrix}}_{\mathbb{A}_i} \begin{bmatrix} \varepsilon(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \tag{11}$$

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR FUNCIONAL

En esta sección se expone la parametrización de las matrices del observador funcional. Considere una matriz cualquiera de rango fila completo $E \in \mathbb{R}^{q_0\times n}$tal que $\Sigma = \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix}$ es una matriz de rango columna completo. Además se considera una matriz $\Omega = \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}$

La condición c) y d) pueden escribirse como:

$$\begin{bmatrix} S_i & M_i \\ P & Q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} T \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L \end{bmatrix} \tag{12}$$

La ecuación (12) debe cumplir lo siguiente para tener una solución:

$$rank\begin{bmatrix} T \\ C \end{bmatrix} = rank\begin{bmatrix} T \\ C \\ L \end{bmatrix} = n \tag{13}$$

ISSN: 2992-8338

Al cumplirse esta condición, existen dos matrices de dimensiones $T \in \mathbb{R}^{q_0}$ y $K \in \mathbb{R}^{q_0}$ tal que:

$$T + KC = E \tag{14}$$

La cual se reescribe como:

$$[T \ K] \underbrace{\begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}}_{\Omega} = E \tag{15}$$

Resolviendo la ecuación (15) se obtiene:

$$[T \ K] = E\Omega^{+} \tag{16}$$

La cual se descompone obteniendo:

$$T = E\Omega^{+} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$K = E\Omega^{+} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \tag{18}$$

Considerando a la matriz T de la ecuación (14) en la condición a) se puede reescribir como:

$$N_i E + K_i C = T A_i \tag{19}$$

donde $K_i = F_i - N_i K$, la ecuación (19) se puede escribir como:

$$[N_i \ K_i] \underbrace{\begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix}}_{\Sigma} = T A_i \tag{20}$$

La solución general de la ecuación (19) esta dada por:

$$[N_i \ K_i] = T A_i \Sigma^{+} - Z_i \left[I - \Sigma\Sigma^{+} \right] \tag{21}$$

donde Z_i es una matriz de dimensiones apropiadas con elementos arbitrarios. La ecuación (21) puede ser reescrita como:

$$N_i = \underbrace{T A_i \Sigma^{+} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}}_{N1i} - Z_i \underbrace{\left[I - \Sigma\Sigma^{+} \right] \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}}_{N2} \tag{22}$$

$$K_i = \underbrace{T A_i \Sigma^{+} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}}_{K1i} - Z_i \underbrace{\left[I - \Sigma\Sigma^{+} \right] \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}}_{K2} \tag{23}$$

Por otro lado, utilizando la ecuación (14) obtenemos lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} S_i & M_i \\ P & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L \end{bmatrix} \tag{24}$$

Sustituyendo la ecuación (24) en (12) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} S_i & M_i \\ P & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & -K \\ 0 & I \end{bmatrix} \Sigma = \begin{bmatrix} 0 \\ L \end{bmatrix} \tag{25}$$

la cual tiene la siguiente solución general:

$$\begin{bmatrix} S_i & M_i \\ P & Q \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ L \end{bmatrix} \Sigma^{+} - \begin{bmatrix} W_{1i} \\ W_{2i} \end{bmatrix} \left[I - \Sigma\Sigma^{+} \right] \right) \begin{bmatrix} I & K \\ 0 & I \end{bmatrix} \tag{26}$$

donde W_{1i} y W_2 son matrices de dimensiones apropiadas con elementos arbitrarios. Encontrando así las matrices S_i, M_i, P y Q.

$$S_i = -W_{1i} \left[I - \Sigma\Sigma^{+} \right] \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \tag{27}$$

$$M_i = -W_{1i} \left[I - \Sigma\Sigma^{+} \right] \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$P = L\Sigma^{+} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} - W_2 [I - \Sigma\Sigma^{+}] \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \tag{29}$$

$$Q = L\Sigma^{+} \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} - W_2 [I - \Sigma\Sigma^{+}] \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} \tag{30}$$

Se asume que $W_{2i} = 0$ por simplicidad. Al usar la ecuación (22) y (27) la dinámica de error del observador (11) se reescribe como:

$$\dot{\varphi} = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta)(\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_1 \mathbb{A}_2)\varphi \tag{31}$$

donde $\mathbb{A}_{1i} = \begin{bmatrix} N_{1i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbb{A}_2 = \begin{bmatrix} N_2 & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix}$ $\mathbb{Y}_i = \begin{bmatrix} Z_i & H_i \\ W_{1i} & G_i \end{bmatrix}$ y $\dot{\varphi} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix}$. El siguiente paso es encontrar la matriz $\mathbb{Y}_i$ que asegure la estabilidad del observador (31).

En la siguiente sección, se aborda el análisis de estabilidad basado en el método de Lyapunov. Para lograrlo, se propone resolver un conjunto de desigualdades matriciales lineales (LMI) con el fin de obtener la matriz $\mathbb{Y}_i$.

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL OBSERVADOR

En esta sección se lleva a cabo el análisis de estabilidad de la dinámica del error de estimación de la Ecuación (31). Se propone la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(\varphi(t)) = \varphi(t)^T \mathbf{X} \varphi(t) > 0 \tag{32}$$

donde $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} > 0$ y $X_1 = X_1^T$ con $X_1 \in \mathbb{R}^{q_0 \times q_0}$ y $X_2 \in \mathbb{R}^{q_1 \times q_1}$.

Derivando la ecuación (32) se tiene:

$$\dot{V}(\varphi(t)) = \dot{\varphi}(t)^T \mathbf{X} \varphi(t) + \varphi(t)^T \mathbf{X} \varphi(t) < 0 \tag{33}$$

sustituyendo el valor de (31) se obtiene:

$$\dot{V}(\varphi(t)) = \varphi(t)^T \left[(\mathbb{A}_{1i}^T - \mathbb{A}_2^T \mathbb{Y}_i^T)\mathbf{X} + \mathbf{X}(\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i \mathbb{A}_2) \right] \varphi(t) < 0 \tag{34}$$

En este caso la desigualdad $\dot{V}(\varphi(t)) < 0$ es válida siempre que $\varphi(t) \neq 0$, si y siempre que la siguiente LMI se cumpla

$$\mathbb{A}_{1i}^T \mathbf{X} - \mathbb{A}_2^T \mathbb{Y}_i^T \mathbf{X} + \mathbf{X}\mathbb{A}_{1i} - \mathbf{X}\mathbb{Y}_i \mathbb{A}_2 \ < 0 \tag{35}$$

Las matrices desconocidas de la ecuación (35) son $\mathbf{X}$ y $\mathbb{Y}_i$, por lo cual la ecuación (35) puede ser reescrita como:

$$\mathcal{B}\mathcal{X}_i + (\mathcal{B}\mathcal{X}_i)^T + \mathcal{D}_i < 0 \tag{36}$$

donde $\mathcal{B} = -\mathbb{A}_2^T$, $\mathcal{X}_i = \mathbb{Y}_i^T X$ $\mathcal{D}_i = \mathbb{A}_{1i}^T \mathbf{X} + \mathbf{X}\mathbb{A}_{1i}$ Posteriormente, Utilizando el lema de eliminación [Skelton et al. (2017)], la desigualdad (36) es equivalente a:

$$\mathcal{B}^{\perp} \mathcal{D}_i \mathcal{B}^{\perp T} < 0, \quad \mathcal{B}\mathcal{B}^T > 0 \tag{37}$$

Finalmente en la ecuación (37) se obtiene la desigualdad matricial lineal a resolver. Donde las matrices $\mathbb{Y}_i$ son parametrizadas de la siguiente manera:

$$\mathbb{Y}_i = \mathbf{X}^{-1} \left(-\sigma \mathcal{B}^T + \sqrt{\sigma} \mathcal{L} \Gamma_i^{1/2} \right)^T \tag{38}$$

ISSN: 2992-8338

donde $\|\mathcal{L}\|$ es cualquier matriz tal que $\mathcal{L} < 1$ y $\sigma > 0$ es cualquier escalar tal que:

$$\Gamma_i = \sigma \mathcal{B}\mathcal{B}^T - \mathcal{D}_i > 0 \tag{39}$$

5. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio de este artículo es el péndulo H2AT, el cual es una variante del péndulo invertido. Se encuentra constituido por dos segmentos rígidos, el primero de ellos representa el tronco o torso del cuerpo humano, mientras que el segundo segmento representa a la cabeza y brazos. Este sistema representa a una persona con lesión completa en la médula espinal. En la Figura 2, se muestra el esquema de dicho sistema:

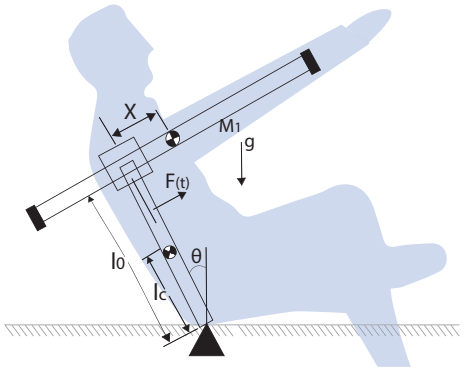


Figura 2. Esquema caso de estudio (H2AT).

Considere la representación dinámica del caso de estudio dado por las siguientes ecuaciones: [Pan et al. (2021)]

$$0 = m_1\ddot{x}(t) - m_1 l_0\ddot{\theta}(t) - m_1 x(t)\dot{\theta}^2(t) + m_1 g sin(\theta(t)) - u(t) \tag{40}$$

$$0 = -m_1 l_0\ddot{x}(t) + J(x(t))\ddot{\theta}(t) + 2m_1 x(t)\dot{x}(t)\dot{\theta}(t) - (m_1 l_0 + m_2 l_c)g sin(\theta(t)) + m_1 g x(t) cos(\theta(t)) \tag{41}$$

donde $u(t)$ es la señal de entrada del sistema, m_1 y m_2 son la masa del segmento superior y la masa del tronco respectivamente, l_0 y l_c representan las longitudes del tronco y la longitud del centro de masa del tronco, $x(t)$ es la flexión completa del cuello con ambos brazos estirados y finalmente $\theta(t)$ es una articulación giratoria (articulación lumbosacra). Se obtiene el modelo no lineal en forma descriptor para el péndulo H2AT (42):

$$\begin{aligned} E(x(t))\dot{x}(t) &= A(x(t))x(t) + B(x(t))u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{42}$$

donde $x(t)$ es el vector de estados del sistema que está formado por $x(t) = \left[x(t)\ \dot{x}(t)\ \theta(t)\ \dot{\theta}(t)\right]^T$. Mientras que el vector de salida dado por $y(t)$. Las matrices A, B, C y E se definen como:

$$A(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{23} & A_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & 0 \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ y } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E(x(t)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & -m_1 l_o \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -m_1 l_o & 0 & J(x(t)) \end{bmatrix} \text{ donde:}$$

$$A_{23} = -m_1 g\frac{sin(\theta(t))}{\theta(t)},\ A_{24} = m_1 x_1(t)\dot{\theta}(t),\ A_{41} = -m_1 g cos(\theta(t)),$$

$$A_{42} = -2m_1 x_1(t)\dot{\theta}(t),\ A_{43} = (m_1 l_o + m_2 l_c)g\frac{sin(\theta(t))}{\theta(t)},$$

$$J(x(t)) = m_1(l_o^2 + x^2(t)) + m_2 l_c^2$$

Cabe mencionar existe una matriz inversa para la matriz E. Simplificando así el modelo (42), de acuerdo con Blandeau et al. (2018) se considera que el término $J(x(t)) \in [5{,}71, 5{,}88]$ tiene una variación muy pequeña, por lo tanto, se utilizara como valor constante de $J(x(t)) = 5{,}79$. Además, como se tienen las restricciones físicas en $\theta(t) \in [-10, 20]$ entonces $|\frac{sen(\theta(t))}{\theta(t)} - cos(\theta(t))| < 4\,\%$ y el término $\frac{sen(\theta(t))}{\theta(t)}$ es remplazado por $cos(\theta(t))$.

Teniendo en cuenta los desarrollos anteriores, el modelo (42) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \overline{A}(x(t))x(t) + \overline{B}u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{43}$$

donde

$$\overline{A} = E^{-1}A(x(t)),\ \ \overline{B} = E^{-1}B \tag{44}$$

6. REPRESENTACIÓN TAKAGI-SUGENO

Partiendo del modelo (43) se pueden identificar $\rho = 2$ no linealidades.

$$z_1(t) = cos(\theta(t)),\ z_2(t) = x(t)\dot{\theta}(t) \tag{45}$$

Considerando una entrada de par constante $u(t) = 30N$ se puede determinar el límite superior e inferior de variación de cada no linealidad como:

$$z_1(t) = cos(\theta(t)) \rightarrow [1, 0{,}9994] \tag{46}$$

$$z_2(t) = x(t)\dot{\theta}(t) \rightarrow [0{,}0020, -0{,}0331] \tag{47}$$

Posteriormente, se definen las funciones de ponderación para cada no linealidad [Lendek et al. (2011)], las cuales son:

$$\begin{aligned} \eta_0^1(z_1) &= \frac{\overline{z_1} - z_1}{\overline{z_1} - \underline{z_1}},\ \eta_1^1(z_1) = 1 - \eta_0^1 \\ \eta_0^2(z_2) &= \frac{\overline{z_2} - z_2}{\overline{z_2} - \underline{z_2}},\ \eta_1^2(z_2) = 1 - \eta_0^2 \end{aligned} \tag{48}$$

A partir de las funciones de ponderación construimos $2^\rho = 4$ reglas difusas.

$$\begin{aligned} \mu_1(z_j) &= \eta_0^1\eta_0^2,\ \mu_2(z_j) = \eta_0^1\eta_1^2 \\ \mu_3(z_j) &= \eta_1^1\eta_0^2,\ \mu_4(z_j) = \eta_1^1\eta_1^2 \end{aligned}$$

De modo que la representación del sistema Takagi-Sugeno se reduce a:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(\delta)(A_i x(t)) + Bu(t) \tag{49}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{50}$$

7. RESULTADOS

En esta sección, se lleva a cabo la simulación del péndulo H2AT, el cual representa a una persona con lesión en la médula, esto con ayuda de los siguientes los parámetros mostrados en la Tabla 1.

donde $\hat{z}(t)$ es la función estimada del observador que se obtuvo en la sección anterior. En la Figura 3 se

ISSN: 2992-8338

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Parámetros	Valores	Unidades	Definición
m_1	16.1	kg	Masa segmento superior
m_2	26.64	kg	Masa del tronco
l_0	0.477	m	Longitud del tronco
l_c	0.2766	m	Longitud del centro de masa
g	9.81	m/s^2	Gravedad
F	$\hat{z}(t)$	N	Fuerza controlada

considera una señal de perturbación aplicada a la entrada del sistema para poner a prueba el controlador diseñado. Dicha señal es un escalón con valor de $f_1 = -3N$ con tiempo de duración de 2,5s. Esta fuerza fue aplicada en el segundo 17 debido a que se buscaba verificar que la ley de control regule el error a cero y a su vez verificar la robustez de la ley de control.

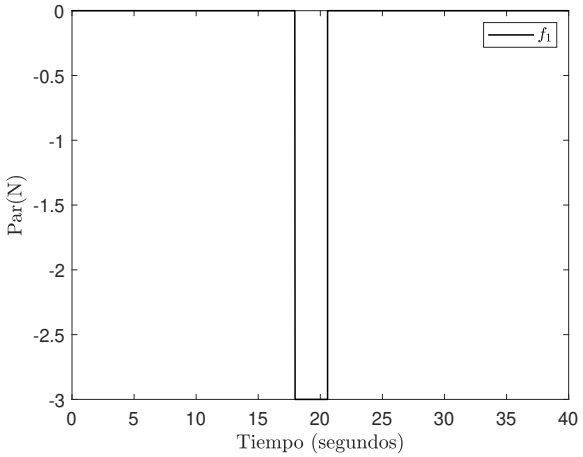


Figura 3. Señal de perturbación.

En la Figura 4 se puede observar la gráfica de la ley del control del sistema ante una perturbación de $f_1 = -3N$. Esta ley de control regula el comportamiento del sistema, con el propósito de estabilizar la posición vertical del péndulo H2AT.
Finalmente, en la Figura 5 se muestra la respuesta del controlador por retroalimentación de estados ante una perturbación de $f_1 = -3N$. Se puede observar que el sistema regula el comportamiento del péndulo H2AT regresando al valor estable en todos los estados del sistema.

8. CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo se llevó a cabo el desarrollo de la metodología para el diseño de un observador funcional dinámico generalizado para sistemas Takagi-Sugeno con el enfoque del sector no lineal, del mismo modo para garantizar la estabilidad del observador se propuso una función cuadrática de Lyapunov, esto mediante el uso de LMIs.

Con la ayuda del observador funcional se estima una función la cual es la ley de control por retro alimentación de estados estimada utilizando la información brindada

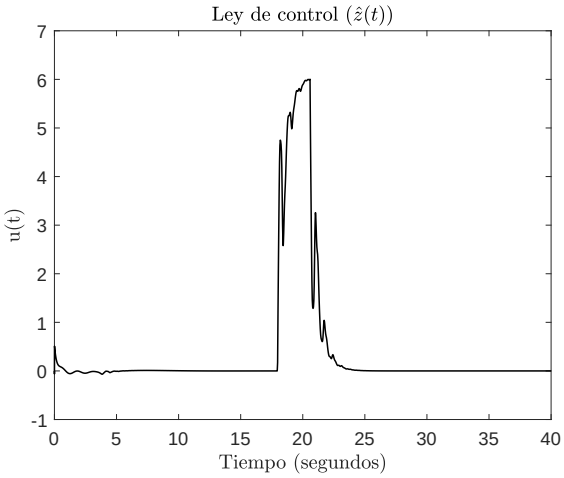


Figura 4. Respuesta de la ley del control.

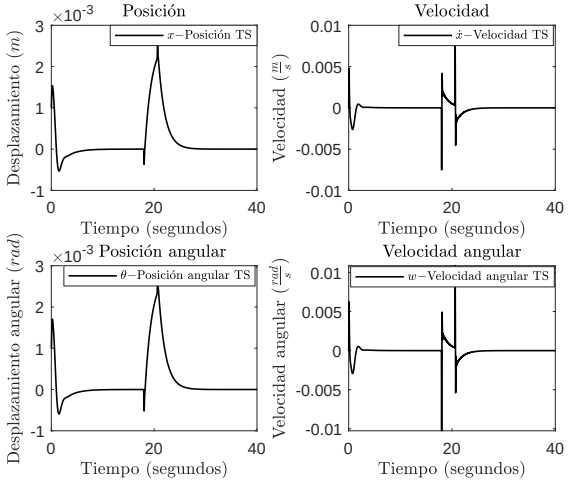


Figura 5. Respuesta del controlador.

por el observador previamente diseñado, esto con el objetivo de estabilizar el sistema. Además, se añadió una perturbación en los estados para corroborar el correcto funcionamiento de la ley de control del sistema.

Para verificar la efectividad del observador diseñado y de la ley de control propuesta se consideró el péndulo H2AT, el cual representa a una persona con lesión en la médula espinal.

Por ello, se concluye que observador funcional dinámico generalizado propuesto posee una gran ventaja ya que al añadir dinámica para incrementar los grados de libertad del observador genera que esté genere una mayor precisión en estado estacionario y a su vez mejorar la robustez ante perturbaciones o incertidumbres parametricas.

Por otra parte, el enfoque del sector no lineal Takagi-Sugeno representa fielmente la dinámica del sistema no

ISSN: 2992-8338

lineal, esto mediante un conjunto compacto de la representación de espacio de estados.

REFERENCIAS

Blandeau, M., Estrada-Manzo, V., Guerra, T., Pudlo, P., and Gabrielli, F. (2018). Fuzzy unknown input observer for understanding sitting control of persons living with spinal cord injury. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67, 381–389. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.09.016.

Chiu, C.H., Hung, Y.T., and Peng, Y.F. (2021a). Design of a decoupling fuzzy control scheme for omnidirectional inverted pendulum real-world control. *IEEE Access*, 9, 26083–26092. 10.1109/ACCESS.2021.3057658.

Chiu, C.H., Hung, Y.T., and Peng, Y.F. (2021b). Design of a decoupling fuzzy control scheme for omnidirectional inverted pendulum real-world control. *IEEE Access*, 9, 26083–26092. 10.1109/ACCESS.2021.3057658.

Flores-Martínez and Osorio-Gordillo (2019). Fuzzy functional observer for the control of the glucose-insulin system. *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, 37(4), 5085–5096. 10.3233/JIFS-182872.

Guadarrama-Estrada and Osorio-Gordillo (2019). Functional generalized dynamic observer for discrete takagi-sugeno systems. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*. 10.3233/JIFS-182872.

Khadhraoui, M. and Messaoud, H. (2020). Design of a functional observer for non-linear singular delayed systems. In *2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, 1–7. 10.1109/ICCAD49821.2020.9260570.

Lendek, Z., Guerra, T., Babuška, R., and Schutter, B.D. (2011). *Stability Analysis and Nonlinear Observer Design using Takagi-Sugeno Fuzzy Models*. 1 ed. 10.1007/978-3-642-16776-8.

M.Blandeau and Estrada-Manzo, V. (2016). Unknown input observer for understanding sitting control of persons with spine cord injury. *IFAC-PapersOnLine*, 49(5), 175–181. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.109. 4th IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences ICONS 2016.

Mátyás, A. and Lendek, Z. (2021). Observer design for time-delay ts fuzzy systems with nonlinear consequents. *IFAC-PapersOnLine*, 54(4), 62–67. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.011.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. 5 ed.

Pan, J., Li, R., Wang, S., and Zhang, W. (2021). Fuzzy fault detection observer design for head-two-arms-trunk system. In *2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 261–266. 10.1109/ICIEA51954.2021.9516399.

Skelton, R., Iwasaki, T., and Grigoriadis, K. (2017). *A unified algebraic approach to linear control design*. 10.1201/9781315136523.

Xie, W.B., Wang, T.Z., Lam, H.K., and Wang, X. (2020). Functional observer–controller method for unmeasured premise variables takagi-sugeno systems with external disturbance. *International Journal of Systems Science*, 51(16), 3436–3450. 10.1080/00207721.2020.1817609.

ISSN: 2992-8338

Improving the quality of digital images using the truncated-$\mathcal{M}$ fractional Gaussian gradient

Arturo García Morelos * **Jesús Emmanuel Solís Pérez** **
Daniela Hernández Castañeda *
José Francisco Gómez Aguilar ***

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: m22ce060@cenidet.tecnm.mx)*
** *Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, C.P. 76230, Juriquilla, Querétaro, México.(e-mail: jsolisp@unam.mx)*
*** *CONAHCyT - Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: jose.ga@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract
In this study, we explore the application of the fractional $\mathcal{M}$-truncated derivative to generalize the Gaussian kernel. The resulting kernel gets a gradient and can be used in digital images to improve quality. This approach has important implications in the field of medical image analysis. The results of our experiments indicate that the proposed operator outperforms conventional integer-order operators as it can more accurately identify edge details in medical images. Furthermore, it is more robust against noise, making it a promising tool.

Keywords: $\mathcal{M}$-truncated derivative, $\mathcal{M}$-fractional Gaussian gradient, edge detection, curve detection.

1. INTRODUCCIÓN

La detección de bordes se encuentra entre las técnicas más frecuentemente empleadas para la extracción de información en imágenes digitales. Esta técnica desempeña un papel crucial al reducir la cantidad de datos que deben ser procesados, a la vez que mantiene la integridad estructural de la imagen. El objetivo principal de la detección de bordes consiste en identificar puntos dentro de una imagen digital en los cuales se produce un cambio abrupto en el nivel de intensidad con respecto a sus píxeles adyacentes (Jain, 1989). Esto se traduce en la identificación de discontinuidades locales en la intensidad de los píxeles que marcan los límites de los objetos presentes en la escena. Dicha información resulta de gran utilidad en aplicaciones diversas, que abarcan desde el reconocimiento de objetos y seguimiento, hasta la reconstrucción tridimensional y el procesamiento de imágenes médicas.

La literatura ofrece numerosos algoritmos de detección de bordes, tanto en el dominio espacial como en el dominio de frecuencia. Estos algoritmos, por lo general, hacen uso de operadores diferenciales de primer y segundo orden, conocidos como gradientes y laplacianos, respectivamente. Los operadores de primer orden tienden a producir bordes más anchos, lo que puede resultar en la pérdida de detalles, mientras que los operadores de segundo orden presentan una mejor capacidad de respuesta a detalles finos, aunque muestran mayor sensibilidad al ruido (Davies, 1987).

En años recientes, el cálculo fraccional ha despertado un gran interés en diversas disciplinas científicas, que incluyen la física, biología, control automático, robótica y procesamiento de señales. Esto se debe a que el cálculo fraccionario permite representar sistemas o fenómenos físicos con mayor precisión que los sistemas de orden entero tradicionales, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la modelización y comprensión de procesos complejos (Yang et al., 2016).

2. PRELIMINARES MATEMÁTICOS

La derivada $\mathcal{M}$ de f de orden α, denotada como ${}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}\{f(t)\}$, se define a continuación

$$ {}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}\{f(t)\} = \lim_{\epsilon\to 0} \frac{f\left(t_i E_\beta\left(\epsilon t^{-\alpha}\right)\right) - f(t)}{\epsilon}, \qquad (1) $$

donde la función truncada de Mittag-Leffler de un parámetro se define como sigue

$$ {}_iE_\beta(z) = \sum_{k=0}^{i} \frac{z^k}{\Gamma\left(\beta k + 1\right)}. \qquad (2) $$

Algunas propiedades de esta derivada se presentan en el siguiente teorema (Salahshour et al., 2018).

Teorema 1. Sea $0 < \alpha \leq 1, \beta > 0$ $a, b \in \mathbb{R}$ y f, g α-diferenciable en el punto $t > 0$. Entonces

ISSN: 2992-8338

(1) ${}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}(af+bg)(t) = a{}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}f(t) + b{}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}g(t)$.
(2) ${}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}(f\cdot g)(t) = f(t){}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}g(t) + g(t){}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}f(t)$.
(3) ${}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}\left(\frac{f}{g}\right)(t)\frac{g(t){}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}f(t) - f(t){}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}g(t)}{[g(t)]^2}$.
(4) ${}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}(c) = 0$, donde $f(t) = c$ es una constante.
(5) (Regla de la cadena). Si f es diferenciable, entonces ${}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}\{f(t)\} = \frac{t^{1-\alpha}}{\Gamma(\beta+1)}\frac{df(t)}{dt}$.

A continuación se presenta el siguiente operador el cual incluye la ley de potencia, el decaimiento exponencial y la memoria Mittag-Leffler completa en convolución con la derivada $\mathcal{M}$-truncada (Solís-Pérez y Gómez-Aguilar, 2020).

$$ {}_0^{\mathcal{M}RL}\mathscr{D}_t^{\alpha,\beta,\gamma}\{y(t)\} = \frac{1}{\Gamma(n-\gamma)}{}_i^{\mathcal{M}}\mathscr{D}^{\alpha,\beta}\int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\gamma-n+1}}\,d\tau, \tag{3} $$

para $\quad n-1 < \alpha, \gamma \leq n, \quad \beta > 0.$

2.1 Filtro de kernel Gaussiano

El filtro de kernel Gaussiano es un tipo de filtro utilizado en el procesamiento de imágenes para suavizar o difuminar la imagen. Este filtro se basa en la función de distribución Gaussiana, también conocida como campana de Gauss. El kernel Gaussiano es una matriz de números que se utiliza como máscara de convolución para aplicar el filtro a la imagen.

La fórmula general para el cálculo de los valores del kernel Gaussiano está dada como sigue

$$ g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \tag{4} $$

donde μ es la media, σ la desviación estándar y x es la entrada.

El tamaño del kernel Gaussiano determina el nivel de suavizado aplicado a la imagen. Generalmente, se utiliza un kernel de tamaño impar, por ejemplo, 3×3, 5×5, 7×7, etc., para mantener la simetría y el punto central. Este operador se desliza el kernel sobre cada píxel de la imagen y se calcula el promedio ponderado de los valores de los píxeles vecinos, utilizando los valores del kernel Gaussiano como pesos. Además, es ampliamente utilizado en tareas de suavizado de imágenes, eliminación de ruido y detección de bordes.

Su efecto de suavizado gradual preserva los detalles importantes de la imagen mientras reduce el ruido y las irregularidades. Es importante mencionar que el tamaño y la desviación estándar del kernel Gaussiano pueden ajustarse según las necesidades específicas de cada aplicación (Gonzalez, 2009).

3. METODOLOGÍA

La metodología para obtener el gradiente Gaussiano utilizando el nuevo operador fraccionario con ley de potencia y ley de decaimiento exponencial en convolución del núcleo de Mittag-Leffler con la derivada truncada dada en la ecuación (3) se detalla a continuación.

Primero se obtiene la derivada del kernel Gaussiano como se muestra a continuación

$$ g'(x) = \frac{-(x-\mu)^2}{\sigma^3\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \tag{5} $$

y se puede escribir la siguiente ecuación diferencial fraccionaria usando la derivada $\mathcal{M}$-truncada fraccionaria

$$ {}_0^{\mathcal{M}RL}\mathscr{D}_t^{\alpha,\beta,\gamma}\{g(x)\} = \frac{t^{1-\alpha}}{\Gamma(\beta+1)}f(x), \tag{6} $$

donde $f(x) = \frac{-(x-\mu)^2}{\sigma^3\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$.

La ecuación (6) se convierte en una ecuación de tipo Volterra ya que la integral fraccionaria es diferenciable. Por lo tanto, la derivada de Riemann-Liouville se puede reemplazar por la derivada de Liouville-Caputo. Al aplicar la integral de Lotka-Volterra en ambos lados de la ecuación (6), se obtiene la siguiente ecuación

$$ g(x) = f_0 + \frac{1}{\Gamma(\gamma)}\int_0^x \frac{\lambda^{1-\alpha}(x-\lambda)^{\gamma-1}}{\Gamma(\beta+1)}f(x,\lambda)\mathrm{d}\lambda. \tag{7} $$

En un punto dado $x = x_n + 1, n = 0, 1, 2, \ldots$, la ecuación anterior se reformula

$$ g_{n+1} = f_0 + \frac{1}{\Gamma(\gamma)}\int_0^{x_{n+1}} \frac{\lambda^{1-\alpha}\left(x_{n+1}-\lambda\right)^{\gamma-1}}{\Gamma(\beta+1)}f(x,\lambda)\mathrm{d}\lambda. \tag{8} $$

Las funcion $g(x,\lambda)$, se puede aproximar usando la interpolación Lagrangiana por partes de la siguiente manera

$$ g_{n+1} = f_0 + \frac{1}{\Gamma(\gamma)}\sum_{j=0}^{n}\int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{\lambda^{1-\alpha}\left(t_{n+1}-\lambda\right)^{\gamma-1}}{\Gamma(\beta+1)}f(x,\lambda)d\lambda. \tag{9} $$

Finalmente, en $[x_j, x_j+1]$ se obtiene una aproximación numérica a la solución de la ecuación dada en (6)

$$ \begin{aligned} g_{n+1} = f_0 + \frac{(\Delta t)^\gamma}{\Gamma(\gamma+2)}\sum_{j=0}^{n}\Bigg[& \frac{x_j^{1-\alpha}f(x_j)}{\Gamma(\beta+1)} \\ & \left((n+1-j)^\gamma(n-j+2+\gamma) - (n-j)^\gamma\times\right. \\ & \left.\times(n-j+2+2\gamma)\right) - \frac{x_{j-1}^{1-\alpha}f\left(x_{j-1}\right)}{\Gamma(\beta+1)} \\ & \left((n-j+1)^{\gamma+1} - (n-j)^\gamma(n-j+1+\gamma)\right). \end{aligned} \tag{10} $$

El gradiente Gaussiano que involucra la derivada fraccionaria $\mathcal{M}$-truncada se obtiene a partir de las siguientes expresiones.

A lo largo de x esta dado por

$$ {}^{\mathcal{M}RL}\nabla I_x = g^{\alpha,\beta,\gamma} \otimes h_x \otimes I, \tag{11} $$

mientras que a lo largo de y

ISSN: 2992-8338

$$^{\mathcal{MRL}}\nabla I_y = g^{\alpha,\beta,\gamma} \otimes h_y \otimes I, \quad \alpha,\beta,\gamma \in (0,1), \tag{12}$$

donde I es una imagen en escala de grises y además

$$h_x = [\,-1 \;\; 0 \;\; 1\,], \tag{13}$$

$$h_y = h_x^T = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Las ecuaciones (13) y (14) representan los filtros derivativos a lo largo de x e y, respectivamente.

Por lo tanto, tomando en consideración las ecuaciones (11) y (12), representamos el detector de bordes como se muestra a continuación

$$^{\mathcal{MRL}}\nabla I_{xy} = \left|^{\mathcal{MRL}}\nabla I_x\right| + \left|^{\mathcal{MRL}}\nabla I_y\right|. \tag{15}$$

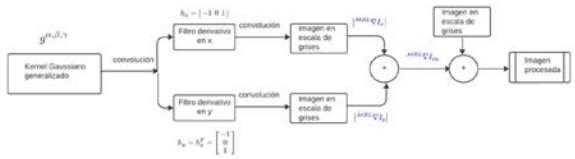


Figure 1. Metodología para el procesamiento de imagenes usando la derivada-$\mathcal{M}$ truncada fraccionaria.

4. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

En la literatura, se encuentran diversas métricas diseñadas para evaluar distintas propiedades de una imagen que ha sido sometida a un proceso de procesamiento de imágenes en comparación con la imagen original. En este contexto, la primera métrica que consideramos es la entropía. La entropía en el contexto de una imagen se refiere a una medida de la aleatoriedad o desorden presente en los niveles de intensidad de los píxeles de una imagen. En otras palabras, la entropía cuantifica cuánta información se necesita para describir la imagen en términos de variaciones en sus niveles de intensidad.

La entropía (H) se basa en la teoría de la información y se utiliza en el procesamiento de imágenes y la visión por computadora para varios propósitos, como la segmentación de imágenes, la detección de bordes, la compresión de imágenes y la evaluación de la calidad de la imagen. Una imagen con alta entropía se considera más compleja y contiene más información, mientras que una imagen con baja entropía es más homogénea y predecible (Pratt, 2007).

La expresión utilizada para calcular la entropía de una imagen en escala de grises es

$$\mathrm{H} = -\sum_k p_k \log_2(p_k), \tag{16}$$

donde p_i es la probabilidad de que un píxel tenga un valor de intensidad i en la imagen.

La medición del nivel de ruido en la detección de bordes a menudo se realiza utilizando métricas comunes como la relación señal-ruido (PSNR) y el error cuadrático medio (MSE). Aunque estas métricas no son específicas para evaluar la precisión de la detección de bordes, son útiles para evaluar la robustez de los algoritmos, ya que proporcionan una medida cuantitativa del nivel de ruido presente en las imágenes resultantes.

El PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) es una métrica utilizada para medir la calidad de una imagen en comparación con una imagen de referencia. Se calcula mediante la siguiente fórmula

$$\mathrm{PSNR} = 10 \log \frac{\max(I)^2}{MSE}, \tag{17}$$

donde $\max(\cdot)$ es el valor máximo que puede tomar un píxel en la imagen. Por ejemplo, 255 para una imagen en escala de grises de 8 bits.

MSE (Mean Squared Error) es el error cuadrático medio, que se calcula como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de los píxeles de la imagen de referencia y la imagen evaluada, dividido por el número total de píxeles

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{mn}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[I_1(x,y) - I_2(xy)\right]^2, \tag{18}$$

donde

- m y n son las dimensiones de las imágenes (en píxeles).
- $I_1(i,j)$ es el valor del píxel en la posición (i,j) de la imagen original.
- $I_2(i,j)$ es el valor del píxel correspondiente en la imagen de referencia (o la imagen procesada que estamos comparando).

El PSNR se expresa en decibelios (dB) y proporciona una medida cuantitativa de la calidad de la imagen. Cuanto mayor sea el valor de PSNR, mayor será la similitud entre las imágenes y mejor será la calidad de la imagen evaluada en comparación con la imagen de referencia (Gonzalez, 2009).

El SSIM (Structural Similarity Index) es una métrica de calidad de imagen que se utiliza para medir la similitud estructural entre una imagen de referencia (original) y una imagen que ha sido procesada o comprimida. El SSIM se utiliza comúnmente en el procesamiento de imágenes y la compresión de imágenes para evaluar cuánto se ha degradado la calidad de una imagen después de un procesamiento o compresión.

El SSIM se basa en la percepción visual humana y tiene en cuenta varios aspectos de la calidad de una imagen, incluyendo la luminancia, el contraste y la estructura. Evalúa la similitud entre regiones locales de las dos imágenes y produce un valor numérico que varía entre -1 y 1, donde 1 indica que las dos imágenes son idénticas en términos de estructura y calidad, y valores más bajos indican una mayor diferencia.

El SSIM se calcula considerando los siguienes componentes:

ISSN: 2992-8338

- Luminancia (L): Mide la similitud en la intensidad de los píxeles entre las dos imágenes.
- Contraste (C): Evalúa la similitud en las diferencias de intensidad entre regiones locales de las dos imágenes.
- Estructura (S): Evalúa la similitud en la estructura de las texturas de las dos imágenes.

Además, estas componentes proporcionan una medida general de cuánto se asemeja la imagen procesada a la imagen original en términos de percepción visual. Cuanto más cercano a 1 sea el valor del SSIM, mayor será la similitud estructural entre las imágenes. Además, es una herramienta importante en la evaluación de la calidad de imágenes en diversas áreas (Sheikh et al., 2006). Por lo tanto, podemos expresar SSIM como sigue

$$\text{SSIM(x, y)} = (L(x,y))^{\alpha}.(C(x,y))^{\beta}.(S(x,y))^{\gamma}. \tag{19}$$

Aquí, x y y son las dos imágenes que se están comparando, y α, β y γ son parámetros que controlan la importancia relativa de los componentes L, C y S, respectivamente. La elección de estos parámetros depende de la aplicación específica y de cómo se quiere ponderar la importancia de la luminancia, el contraste y la estructura en la evaluación de la calidad de la imagen.

La medida de mejora por entropía (EMEE, por sus siglas en inglés, Entropy-Based Enhancement Evaluation) es una métrica utilizada para evaluar la calidad de una imagen después de haber sido sometida a un proceso de mejora o realce de la misma. Esta métrica se basa en el concepto de la entropía, que mide la información y la incertidumbre en una imagen. El cálculo de la EMEE implica comparar la entropía de la imagen original con la entropía de la imagen mejorada. En términos generales, una mayor diferencia positiva en la entropía entre la imagen mejorada y la imagen original sugiere que la mejora ha sido exitosa

$$\text{EMEE} = \frac{1}{L^2}\sum^{L}\sum^{L}\alpha\left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}}\right)^{\alpha}\ln\left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}}\right)\cdot f_{\min} > 0. \tag{20}$$

El término "BRISQUE" se refiere a un algoritmo y una métrica de calidad de imagen llamada "Blur/Sharpness Identification through Clustering and Kernel Estimation" (Identificación de Desenfoque/Nitidez mediante Agrupación y Estimación del Núcleo). Esta métrica se utiliza para evaluar la calidad de imágenes digitales y determinar si una imagen está borrosa o nítida.

BRISQUE se basa en técnicas de aprendizaje automático y utiliza un modelo estadístico para evaluar la calidad de la imagen. Implica la extracción de características de la imagen, como estadísticas de textura y contraste, y luego se utiliza un modelo entrenado previamente para predecir la calidad de la imagen en términos de su nitidez o desenfoque. BRISQUE proporciona un valor numérico que refleja la calidad de la imagen en términos de su nitidez. Un valor bajo de BRISQUE indica una imagen nítida, mientras que un valor alto sugiere que la imagen puede estar borrosa o de baja calidad. La expresión para calcular el BRISQUE (Blur/Sharpness Identification through Clustering and Kernel Estimation) se basa en un modelo estadístico que utiliza una serie de características extraídas de la imagen. BRISQUE se basa en técnicas de aprendizaje automático y utiliza un modelo de regresión para predecir la calidad de la imagen en términos de su nitidez o desenfoque (Wang y Li, 2010).

5. SIMULACIONES Y RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta para la reconstrucción de imagenes utilizando la derivada $\mathcal{M}$-truncada fraccionaria. Se tomaron 10,000 valores aleatorios para cada uno de los ordenes no enteros (α, β y γ). Esto con la finalidad de evaluar todos y cada uno de ellos para calcular el PSNR correspondiente a cada valor. Posteriormente, se obtuvo el valor más grande del PSNR. Los valores particulares después de este proceso de simulación fueron: $\alpha = 0.049654$, $\beta = 0.094307$ y $\gamma = 0.868573$.

(a) Original (b) Imagen procesada

Figure 2. Imagen "San Diego (North Island NAS)". (a) Imagen original, (b) Imagen procesada.

La Tabla 1 muestra la la entropía, el SSIM, el EMEE y el BRISQUE para los valores correspondiente al máximo PSNR.

Table 1. Métricas para la Figura 2.

Métrica	**Resultado**
Entropía imagen procesada	7.4862
Entropía imagen original	7.4081
PSNR	25.7046
SSIM	0.9407
EMEE	1.0211
BRISQUE	20.4567

La Figura 2a fue tomada de la base de datos "Aerials" (Weber, 2006).

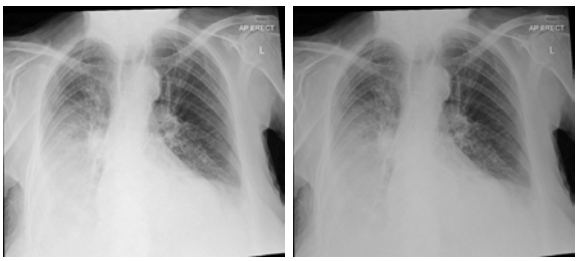
También se realizó una simulación con los siguientes valores: α, β , γ = 1. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

ISSN: 2992-8338

Table 2. Métricas para la Figura 2 con α, β, $\gamma = 1$.

Métrica	Resultado
Entropía imagen procesada	7.4977
Entropía imagen original	7.4081
PSNR	24.8276
SSIM	0.9286
EMEE	1.0243
BRISQUE	19.2358

A continuación se muestran los resultados obtenidos para una imagen médica tomada de la base de datos radiopaedia. Este resultado es de suma importancia, ya que los profesionales de la salud trabajan interpretando visualmente los resultados de la imagen procesada.



(a) Original (b) Imagen procesada

Figure 3. Imagen "Lung abscess and pleural empyema". (a) Imagen original, (b) Imagen procesada.

La evaluación de los resultados mostrados en la Figura 3, se muestran en la Tabla 3.

Table 3. Métricas para la Figura 3.

Métrica	Resultado
Entropía imagen procesada	7.3471
Entropía imagen original	7.3459
PSNR	39.2426
SSIM	0.9926
EMEE	0.5743
BRISQUE	35.1369

Los resultados de evaluación para la simulación de la Figura 3a con valores de α, β, $\gamma = 1$ se muestran en la Tabla 4.

Table 4. Métricas para la Figura 3 con α, β, $\gamma = 1$.

Métrica	Resultado
Entropía imagen procesada	7.3467
Entropía imagen original	7.3459
PSNR	38.4027
SSIM	0.9913
EMEE	0.5724
BRISQUE	34.7942

De acuerdo con estos resultados, se observa que no sólo es posible mejorar el brillo de la imagen sino conservar similitud estructural. Estos resultados, además de ofrecer al lector un resultado visual aceptable, ofrecen una metodología adaptable a cualquier imagen digital de interés. Además, los ordenes fraccionarios particulares óptimos pueden ser calculados utilizando un algoritmo de optimización. Para ello, es necesario establecer una función objetivo a minimizar o maximizar.

6. CONCLUSIONES

La estrategia utilizada en esta investigación arroja resultados positivos al compararla con enfoques previamente descritos en la literatura. En contraste con otros trabajos de investigación, nuestra estrategia no requiere pasos adicionales antes ni después del procesamiento, lo que implica un ahorro significativo en términos de recursos computacionales. Además, al tener tres grados de libertad posibilita la adaptación a la naturaleza de la imagen de entrada. Esto conlleva a mejoras visuales que se pueden medir cuantitativamente para comparar los resultados de nuestra estrategia con los de otros métodos descritos en la literatura.

Por otro lado, en las pruebas realizadas se puede apreciar mejoras en contraste, luminosidad y saturación de manera visual. Además, al ser evaluada por las métricas SSIM, EMEE y BRISQUE, se puede concluir que los resultados son favorables, cuantitativamente hablando.

AGRADECIMIENTOS

Arturo García Morelos agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de su beca de maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradecen el apoyo brindado por el CONAHCyT: Cátedras CONAHCyT para jóvenes investigadores 2014. Jesús Emmanuel Solís Pérez y José Francisco Gómez Aguilar agradecen el apoyo del SNII-CONAHCyT.

Jesús Emmanuel Solís Pérez agradece a PAPIIT-DGAPA, UNAM, por los recursos computacionales proporcionados a través del proyecto TA100223.

REFERENCES

Davies, E. (1987). Design of optimal gaussian operators in small neighbourhoods. *Image and Vision Computing*, 5(3), 199–205.

Gonzalez, R.C. (2009). *Digital image processing*. Pearson education india.

Jain, A.K. (1989). *Fundamentals of digital image processing*. Prentice-Hall, Inc.

Pratt, W.K. (2007). *Digital image processing: PIKS Scientific inside*, volume 4. Wiley Online Library.

Salahshour, S., Ahmadian, A., Abbasbandy, S., y Baleanu, D. (2018). M-fractional derivative under interval uncertainty: Theory, properties and applications. *Chaos, Solitons & Fractals*, 117, 84–93.

Sheikh, H.R., Sabir, M.F., y Bovik, A.C. (2006). A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms. *IEEE Transactions on image processing*, 15(11), 3440–3451.

Solís-Pérez, J.E. y Gómez-Aguilar, J.F. (2020). Novel fractional operators with three orders and power-law, exponential decay and mittag–leffler memories involving the truncated m-derivative. *Symmetry*, 12(4), 626.

ISSN: 2992-8338

Wang, Z. y Li, Q. (2010). Information content weighting for perceptual image quality assessment. *IEEE Transactions on image processing*, 20(5), 1185–1198.

Weber, A.G. (2006). The usc-sipi image database: Version 5. *http://sipi.usc.edu/database/*.

Yang, Q., Chen, D., Zhao, T., y Chen, Y. (2016). Fractional calculus in image processing: a review. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 19(5), 1222–1249.

ISSN: 2992-8338

Current Situation of Artificial Vision Algorithms Applied to the Diagnosis of Diabetic Foot Symptoms

M. Santos-Arrieta*, C. Morales-Morales*, A. González-Lorence, M. Castro-Bello*, A. Jiménez-Alejo***

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruiz Massieu, No. 5, Fracc. Villa Moderna, C.P. 39090, Chilpancingo, Guerrero.*
***Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, 76800 San Juan del Río, Querétaro*
Correo: marnbensarrieta@gmail.com

Abstract: The increasing prevalence of diabetes worldwide, particularly in México. Its uncontrolled consequences lead to hyperglycemia and various complications such as retinopathy, nephropathy, neuropathy, and the onset of Diabetic Foot Ulcer (DFU), among others. The early detection of DFU through image recognition methods, such as EfficientDet, stands out for its importance, as well as infrared thermography as a promising tool. This proposal reviews and analyzes the current state of artificial vision algorithms for detecting and diagnosing DFU.

Keywords: Diabetic foot; Mellitus diabetes; Artificial vision algorithms; Thermograms; Technologies.

1. INTRODUCCIÓN

La Diabetes Mellitus (DM), se clasifica en tipo I y tipo II. La primera hace referencia a una producción baja o nula de insulina debido a factores genéticos o infecciones virales (Internationals Diabetes Federation, 2019); la segunda a la reducción de insulina en el páncreas junto con la incapacidad del cuerpo para captar insulina, y está asociada a los hábitos de vida (Internationals diabetes Federation, 2019).

En 2019, a nivel mundial se registraron 425 millones de personas que viven con DM, estimando que para 2045 se incremente a 700 millones (Internationals diabetes Federation, 2019). México, reporta 12.4 millones de personas con diabetes, 9.78% de su población total (Gobierno de México, 2022).

Las consecuencias de la DM no controlada, causa hiperglucemia y diferentes complicaciones, como: retinopatía, nefropatía, enfermedades cardiacas, neuropatía, amputaciones en el pie por ulceración, entre otros. La diabetes tipo II es más común en personas mayores de 60 años, con una tasa anual de fallecimiento de 361 por cada cien mil habitantes, y tipo I, tasa de mortalidad de 30 por cada 100 mil habitantes (Internationals Diabetes Federation, 2019).

Diversos trabajos clasifican y reportan el grado de afectación de la Ulcera de Pie Diabético (UPD), siendo la más usada la escala de medida Meggit-Wagner (Monteiro-Soares et al., 2020), referido la escala 3 absceso profundo, osteomielitis y la 4 a gangrena en los dedos del pie y antepié; y en el extremo de valoración están los pacientes con grado 5 que requiere de amputación (Internationals Diabetes Federation, 2019).

De acuerdo a los reportes estadísticos una persona con diabetes tiene un riesgo de 34% de desarrollar UPD a lo largo de su vida, equivalente a una de cada tres personas (Armstrong et al., 2017). Su reincidencia sucede entre los tres a cinco años. Se prevé que se agrave este padecimiento, por consiguiente, es importante cuidar los factores de riesgo, como la neuropatía, sobrepeso y obesidad (Armstrong et al., 2017).

Hasta la semana epidemiológica 41 del año 2023, en México se han registrado 9, 977 casos nuevos de DM, acumulando 423, 477 de los cuales 12, 171 pertenecen al Estado de Guerrero. (SSA, 2023).

En la actualidad la introducción de técnicas de procesamiento de imágenes digitales se ha convertido en un primer eslabón para la optimización de los resultados en la evaluación del Pie Diabético (PD). La aplicación de algoritmos con un grupo de imágenes resulta ser aceptable en la detección de heridas, así como su tamaño y ubicación (Castañeda et al., 2017).

Esta investigación, se enfoca a la revisión y análisis de la situación de los algoritmos de visión artificial aplicados a la detección y diagnóstico de los síntomas del PD. Se identifican algoritmos capaces de utilizar métodos de aprendizaje profundo (AP) para detectar UPD, Además se reconoce la clasificación de los sistemas automáticos de evaluación de las UPD, se examinan técnicas, métodos y tecnologías de última generación usadas en el diagnóstico y detección de las UPD, considerando aspectos como la segmentación, así como el preprocesamiento de imágenes y termogramas.

2. PROBLEMÁTICA

En los últimos años, la DM presenta un crecimiento exponencial, con énfasis en la UPD, provocando que los servicios de salud sean rebasados, generando altos costos y mayor demanda de infraestructura hospitalaria. Esto ha

ISSN: 2992-8338

motivado que diversos grupos de trabajo propongan herramientas tecnológicas y métodos para la detección temprana de UPD, entre los que destaca el uso de algoritmos de reconocimiento de patrones a través de imágenes, figura 1, (Yap et al., 2021).

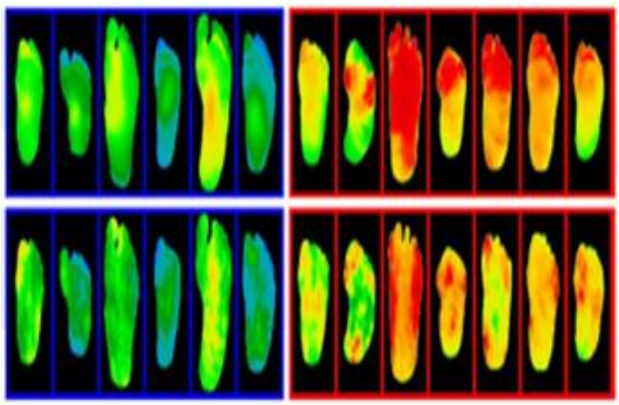


Figura 1. Fotogramas de afecciones por UPD (Yap et al., 2021).

El reconocimiento de patrones, la extracción de características y segmentación de las imágenes son los principales desafíos para diagnósticos asistidos por computadoras y para los métodos de inteligencia artificial; asimismo los más utilizados son los basados en histogramas, en entropía, los justificados en atributos de objetos y los algoritmos genéticos apoyados en el umbral que es el que ha dado mejores resultados, como el algoritmo de la serpiente que aísla la región plantar. Existen métodos clasificadores de imágenes como los de redes neuronales artificiales (RNA), de Aprendizaje Automático a través las máquinas de vectores de soporte (MVS), y de AP mediante las actuales redes neuronales convolucionales (RNC) de última generación. Los algoritmos que siguen la línea de AP y que son entrenados son los algoritmos de tendencia. (Tulloch et al., 2020).

Los trabajos reportados que utilizan los algoritmos son las redes de detección de objetos de AP (Cruz-Vega et al., 2020), otros consideran cámaras infrarrojas para capturar las regiones de temperatura del PD (Úlcera, T > 2.2°C y necróticas, T < -2.2 °C) y posteriormente el procemiento con técnicas de visión artificial (Boyko et al., 1999; Sun et al., 2006; Stess et al., 2023). Por lo tanto, la termografía infrarroja es considerada como un método no invasivo que permite visualizar uniformente la temperatura del pie. Asimismo, las imágenes de colores y los algoritmos que son capaces de detectar la UPD son EfficientDet, YOLOv3 y YOLOv5 (Yap et al., 2021), su conjunto de datos se encuentra disponible para futuras investigaciones (Figura 2).

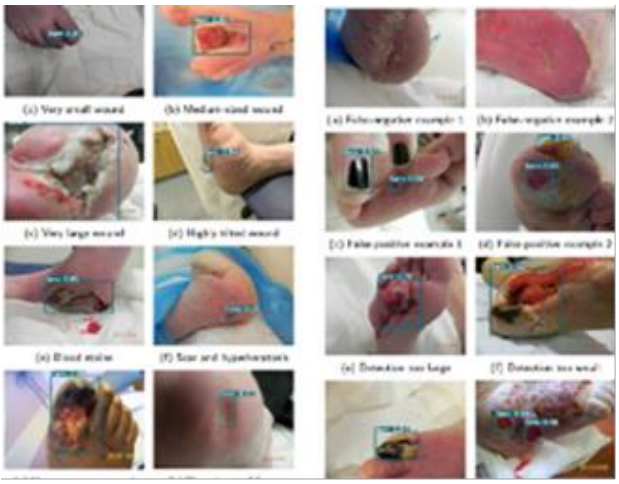


Figura 2. Diferentes Imágenes de Úlceras disponibles (Yap et al., 2021).

En termogramas, las RNC con el algoritmo DFTNet permiten obtener resultados satisfactorios utilizando medidas de sensibilidad, especificidad, precisión y valores de AUC (Cruz-Vega et al., 2020) y en otros casos de clasificación, las RNC como GoogLeNet y AlexNet presentan resultados de precisión que no fueron satisfactorios (Cruz-Vega et al., 2020).

Un marcador del PD afectado o por afectarse, es su aumento de temperatura hasta una semana antes de que se produzca la úlcera (Cruz-Vega et al., 2020). Entre las tecnologías desarrolladas como patentes se encuentran: Tecnología hiperespectral para evaluar y tratar el PD y la enfermedad tisular, utilizan imágenes térmicas o ultrasonido dúplex, MRA, CT o Doppler láser. (Freeman et al., 2019).

Aparato para el diagnóstico de PD. Funciona a través de un motor, es un aparato compacto utilizado por todos, compara valores medidos con valores de referencia, mide la intensidad de la vibración. (Cremerius, et al., 2019).

La temperatura en la región plantar del pie humano es importante, cuantifica la temperatura y los parámetros son trasladados a una plantilla y posteriormente realiza una impresión del pie en 3d, compara la temperatura con el pie no afectado, después mediante sensores de temperatura eléctricos identifica sus niveles afección; además clasifica las posibles fallas fisiológicas (Rodríguez-Alonso et al., 2019).

Por lo anterior, para que la vigilancia epidemiológica se realice de manera adecuada y efectiva se requiere de aparatos tecnológicos que lo realicen en tiempo real, para lograr tal objetivo se pretende aplicar la detección y diagnóstico de PD mediante visión artificial.

ISSN: 2992-8338

3. JUSTIFICACIÓN

La DM es considerada una de las principales enfermedades del mundo, causando afecciones como la neuropatía que provoca el padecimiento del PD, esto originado por falta de atención temprana del paciente. (Internationals Diabetes Federation, 2019).

Por lo que motiva a desarrollar nuevas técnicas, métodos y tecnologías que sean preventivos y de utilidad en el diagnóstico de la UPD, esto representa un desafío a los tecnólogos de discriminar las UPD de otras infecciones de la piel y a su vez, que el paciente mantenga un monitoreo constante y continuo del pie desde su hogar, llevando consigo datos históricos de la salud.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Este trabajo representa una revisión del panorama actual de las tecnologías e investigaciones encargadas de detectar y diagnosticar la UPD, a través de presentar la siguiente clasificación:

- Pueden detectar el pie diabético, pero presentan algunos inconvenientes en sus procesos.
- Están los que realizan la separación, mediante MSV (Maquinas de Soporte Vectorial).
- Los que eligen con RNA y los de última generación, las RNC: YOLOv3, YOLOv5, GoogLeNet y AlexNet
- Mejores evaluados: DFUNet, DFTNet y EfficientDet.

En trabajos futuros se propone desarrollar tecnologías responsivas de bajo costo, robusto y flexible que detecte, diagnostique y evalúe las condiciones del PD antes que las úlceras sean visibles, a través de la captura y análisis de termogramas en tiempo real, tal como se muestra en la figura 3.

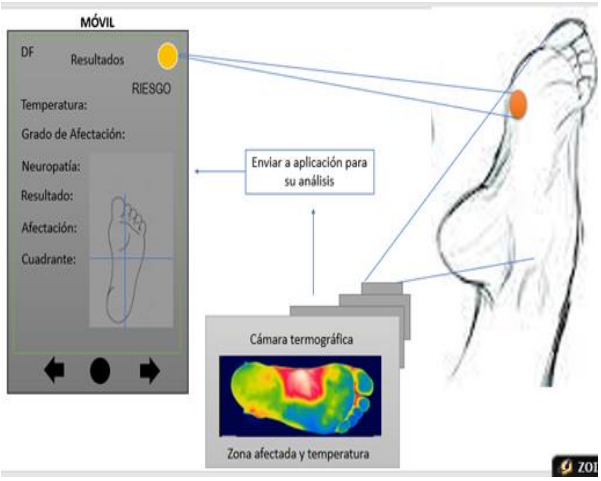


Figura 3. Fotogramas de afecciones por Úlceras del Pie Diabético (Yap et al., 2021).

5. ALCANCES

Este trabajo pretende mostrar la situación actual de las tendencias tecnológicas del diagnóstico y detección de las UPD, y la postura de investigaciones en cuanto a su utilidad como recurso tecnológico en las instituciones de salud.

6. CONCLUSIÓN

La situación actual de los algoritmos de visión artificial, aplicados al diagnóstico y detección de la UPD, revela la urgencia de abordar este creciente problema de salud. La prevalencia global de la epidemia de la DM y sus consecuencias, especialmente la UPD, plantea desafíos significativos para el sector salud, debido a un crecimiento masivo de la enfermedad. Por tal motivo es importante desarrollar tecnologías innovadoras y accesibles que permitan una detección temprana de la UPD, enfocándose en algoritmos de AP y técnicas de procesamiento de imágenes digitales y las imágenes termográficas. La atención a factores de riesgo, como la neuropatía y el sobrepeso, se presenta como crucial para abordar este problema de manera integral.

Existen algoritmos aplicados solo al ambiente clínico, la propuesta de tecnologías responsivas y de bajo costo apunta a una solución práctica y efectiva para la detección y monitoreo continuo del pie diabético. La necesidad de una acción inmediata en el ámbito de la visión artificial y la tecnología para mejorar la detección y gestión de la UPD. La investigación futura y la implementación de soluciones innovadoras son esenciales para hacer frente a este desafío de salud pública y mejorar la calidad de vida de las personas afectadas por la DM.

REFERENCIAS

Armstrong, D. G., Boulton, A. J. M., & Bus, S. A. (2017). Diabetic Foot Ulcers and Their Recurrence. New England Journal of Medicine, 376(24), 2367–2375. [en línea] disponible en <https://doi.org/10.1056/nejmra1615439>[consulta: 26 de octubre de 2023].

Boyko, E. J., H. Ahroni, J., Stensel, V., Forsberg, R. C., Davignon, D. R., & Smith. Douglas G. (1999). A Prospective Study of Risk Factors for Diabetic Foot Ulcer The Seattle Diabetic Foot Study [en línea] disponible en <http://diabetesjournals.org/care/article-pdf/22/7/1036/449916/10388963.pdf>[consulta: 25 de octubre de 2023].

Castañeda, M. Celina, L. (2017). Desarrollo de un algoritmo de visión artificial: un enfoque a la identificación y evaluación temprana de heridas de pie diabético. [en línea] disponible en <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/2087>[consulta: 25 de octubre de 2023].

ISSN: 2992-8338

Cremerius, A. (2019). Aparato Para El Diagnostico De Pie Diabetico. OMPI, Patentscope [en línea] disponible en <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=MX279071645&_cid=P21-LOIWJT-01865-1> [consulta: 2 de noviembre de 2023].

Cruz-Vega, I., Hernandez-Contreras, D., Peregrina-Barreto, H., Rangel-Magdaleno, J. de J., & Ramirez-Cortes, J. M. (2020). Deep learning classification for diabetic foot thermograms. Sensors (Switzerland), 20(6) [en línea] disponible en <https://doi.org/10.3390/s20061762>[consulta: 2 de noviembre de 2023]

Freeman, J. E., Panasyuk, S., Hopmeier, M., Brand, D., Schomacker, K. (2019). Hyperspectral technology for assessing and treating diabetic foot and tissue disease. Google Patents. [en línea] disponible en <https://patents.google.com/patent/US20190059787A1/en?oq=US20190059787A>[consulta: 2 de noviembre de 2023].

Gobierno de México. Disponible, Secretaría de Salud. [en línea] disponible en <https://www.gob.mx/salud/prensa/547-en-mexico-12-4-millones-de-personas-viven-con-diabetes?idiom=es#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20la%20Encuesta%20Nacional,HNH)%20de%20la%20Secretar%C3%ADa%20de>[consulta: 20 de octubre de 2023].

Internationals diabetes Federation. (2019). 463 PEOPLE LIVING WITH DIABETES million.

Monteiro-Soares, M., Boyko, E. J., Jeffcoate, W., Mills, J. L., Russell, D., Morbach, S., & Game, F. (2020). Diabetic foot ulcer classifications: A critical review. Diabetes/Metabolism Research and Reviews, 36(S1) [en línea] disponible en <https://doi.org/10.1002/dmrr.3272>[consulta: 2 de noviembre de 2023].

Rodriguez-Alonso, D. H. (2019). Aparato, Método y Sistema para el Registro del Bioparámetro Temperatura en la Región Plantar del Pie Humano. OMPI, Patentscope [en línea] disponible en <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2019147145>[consulta: 2 de noviembre de 2023].

Secretaría de Salud, Dirección General de Epidemiología (2023). Boletín epidemiológico, Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica, Sistema Único de Información [en línea] disponible en <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/867870/sem42.pdf>>[consulta: 25 de octubre de 2023].

Stess, R. M., Sisney, P. C., Moss, K. M., Graf, P. M., Louie, K. S., Gooding, G. A. W., & Grunfeld, C. (n.d.). Use of Liquid Crystal Thermography in the Evaluation of the Diabetic Foot (Vol. 9, Issue 3) [en línea] disponible en <http://diabetesjournals.org/care/article-pdf/9/3/267/536985/9-3-267.pdf>[consulta: 25 de octubre de 2023].

Sun, P. C., Lin, H. Da, Jao, S. H. E., Ku, Y. C., Chan, R. C., & Cheng, C. K. (2006). Relationship of skin temperature to sympathetic dysfunction in diabetic at-risk feet. Diabetes Research and Clinical Practice, 73(1),41–46. [en línea] disponible en <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2005.12.012> [consulta: 25 de octubre de 2023].

Tulloch, J., Zamani, R., & Akrami, M. (2020). Machine learning in the prevention, diagnosis and management of diabetic foot ulcers: A systematic review. In IEEE Access (Vol. 8, pp. 198977–199000). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. [en línea] disponible en <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035327[consu>[Consulta: 24 de octubre de 2023].

Yap, M. H., Hachiuma, R., Alavi, A., Brüngel, R., Cassidy, B., Goyal, M., Zhu, H., Rückert, J., Olshansky, M., Huang, X., Saito, H., Hassanpour, S., Friedrich, C. M., Ascher, D. B., Song, A., Kajita, H., Gillespie, D., Reeves, N. D., Pappachan, J. M., … Frank, E. (2021). Deep learning in diabetic foot ulcers detection: A comprehensive evaluation. Computers in Biology and Medicine, 135. [en línea] disponible en <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104596> [consulta: 19 de octubre de 2023].

ISSN: 2992-8338

Electromyographic signal acquisition system

Aldahir Flores Ponce [*] **Odalis Barreto Arenas** [*,**]
Oscar Jiménez Estévez [*]

[*] *Tecnológico Nacional de México/ Campus Cuautla (e-mail: direccion@cuautla.tecnm.mx).*
[**] *Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (e-mail: direccion@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: This article presents the development of an electromyographic signal acquisition system, which, due to its characteristics, presents measurement values in the output signal. The signal acquisition system proposed in this work has the ability to estimate muscle signal values. The structure of the system consists of two stages: the first stage is the muscle sensor (EMG) which uses electrodes to obtain information from muscle signals and the second stage is the microcontroller (Arduino) to receive digital signals and make the conversion to analog signals, for their study. The system is specifically applied to the muscles of the forearm (Extensor digitorum communis, extensor carpi ulnaris, abductor pollicis longus) for the study and obtaining of electromyographic signals. The proposed system can be used in future research for the development and innovation of technologies or for medical purposes.

Keywords: Electromyographic signals, EMG sensor, signal acquisition.

1. INTRODUCCIÓN

Una rama de la ciencia que incluye el estudio, desarrollo e innovación de tecnologías para fines médicos, como terapia o rehabilitación, es la ingeniería biomédica, dentro de esta disciplina se encuentra el desarrollo de interfaces mioeléctricas (EMG); una interfaz EMG es un dispositivo electrónico que hace uso de señales biológicas producidas por los músculos del cuerpo, las cuales son procesadas y analizadas por un sistema de adquisición de datos. Hoy en día el desarrollo de estos dispositivos va en ascenso, y su uso ya no solo se centra en el desarrollo de aplicaciones terapéuticas y de rehabilitación como el caso de las prótesis mioeléctricas, sino también para el control de robots y brazos robóticos, estas nuevas tendencias están incrementando el desarrollo de nuevas tecnologías para facilitar las actividades cotidianas o también para usos de recreación y entretenimiento, por ejemplo, el uso de dispositivos EMG en videojuegos o para reemplazar dispositivos de entrada y salida de una PC, como el mouse o el teclado, Caballero et al. (2002). Las dos condiciones más importantes en bioinstrumentación que no dependen del tipo de señal son la traducibilidad del fenómeno a evaluar y la posibilidad de tener un transductor apropiado para medir la variable de interés. Todo sistema de adquisición de señales bioeléctricas posee un esquema general que se encuentra dividido en cinco etapas: sujeto, interface-electrodo-electrolito-piel, etapa analógica, conversor análogo digital (A/D) y la etapa digital, Correa-Figueroa et al. (2016). En Villarejo (2007), se presenta el desarrollo de un sistema de software para el procesamiento, caracterización y clasificación de señales electromiográficas de superficie aplicando técnicas de inteligencia computacional, con el propósito de detectar intencionalidad en cambios repentinos de movimiento durante la marcha y determinar la función que debe realizar una prótesis transfemoral basada en un sistema de control mioeléctrico en tiempo real, En Aviles et al. (2020) se presenta una metodología basada en la transformada wavelet e indicadores estadísticos para la clasificación de señales electromiográficas supervisadas mediante un sistema de adquisición de bajo costo, aplicadas al movimiento de un brazo robótico. En Vladimir et al. (2018), se propone el control de un Robot Mitsubishi RV-2JA mediante señales electromiográficas de superficie sEMG, mediante señales sEMG en un brazalete que adquiere las señales que generan los músculos a través de sensores superficiales, para el desarrollo de este proyecto se utilizó Simulink de Matlab para procesar, identificar, validar y controlar el robot por medio de las sEMG.

Con base en lo anterior, este trabajo busca discutir: a) el diseño y desarrollo de un sistema de instrumentación y medida para la captación de señales electromiográficas, b) los algoritmos implementados utilizando técnicas de adquisición continua en tiempo real, c) las técnicas de caracterización híbridas en tiempo y frecuencia. Betancourt et al. (2004).

La principal contribución del proyecto es diseñar un sistema haciendo uso de sensores biológicos, específicamente en este caso, el sensor muscular EMG, para la obtención de señales electromiográficas de los músculos del cuerpo humano, que posteriormente permitan el tratamiento de las señales para fines de diseño, control o supervisión de prótesis, sistemas autónomos, entre otras aplicaciones que podrán brindar una solución a un problema real y por consecuencia hacer un aporte científico a la sociedad.

ISSN: 2992-8338

2. EMG SENSOR

La medición de la activación muscular mediante potencial eléctrico denominada electromiografía (EMG) se ha utilizado tradicionalmente para la investigación médica y el diagnostico de trastornos neuromusculares. Sin embargo, con la llegada de microcontroladores y circuitos integrados cada vez más potentes y cada vez más reducidos, los circuitos y sensores EMG han encontrado su camino hacia las prótesis, la robótica y otros sistemas de control, Skinner et al. (2009) En la Fig. 1 se muestra la estructura física del sensor EMG .

Fig. 1. Estructura física del sensor EMG

La captación de las señales eléctricas producidas por los músculos durante una contracción muscular, se conoce como electromiografía, estas señales son generadas por el intercambio de iones a través de las membranas de las fibras musculares debido a una contracción muscular.
La electromiografía (EMG) consiste básicamente en la adquisición, registro y análisis de la actividad eléctrica generada en nervios y músculos, mediante la utilización de electrodos (superficiales, de aguja, implantados), Skinner et al. (2009). Las mediciones extraídas de EMG proporcionan una información valiosa acerca de la fisiología y los patrones de activación muscular. La amplitud, y las propiedades de las señales EMG tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia dependen de factores tales como: El tiempo y la intensidad de la contracción muscular, la distancia entre el electrodo y la zona de actividad muscular, Las propiedades de la piel (por ejemplo, el espesor de la piel y tejido adiposo) y las propiedades del electrodo, como el amplificador y la calidad del contacto entre la piel y el electrodo. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de conexión.

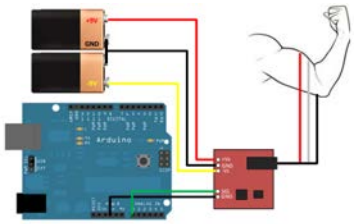


Fig. 2. Diagrama de conexión

Los aspectos más importantes relacionados con la adquisición y el análisis de señales EMG de superficie , fueron tratados recientemente en un consenso multinacional llamado SENIAM: Surface EMG for the Non-Invasive Assessment of Muscles, donde se discutió desde la construcción del electrodo hasta su ubicación. La medición y la representación de las señales EMG de superficie dependen de las propiedades de los electrodos y su interacción con la piel, el diseño del amplificador y la conversión y subsecuente almacenamiento de la señal de formato analógico a digital (A/D), Cáceres Barra et al. (2018). En la Fig. 3, se muestra el diagrama de conexión del sensor

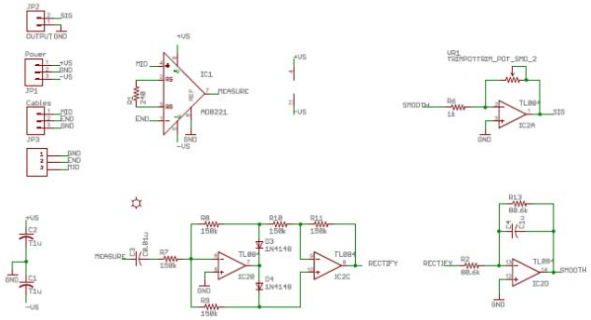


Fig. 3. Circuito esquemático del sensor muscular

También se presenta la tabla con las especificaciones eléctricas del sensor.

Table 1. Especificaciones eléctricas

Parámetro	Mín	TYP	Máx
Tensión de alimentación (Vs)	±3V	±5V	±30V
Configuración de ganancia, ganancia = 207*(X/1kΩ)	0.01Ω	50KΩ	100KΩ
Voltaje de señal de salida (rectificado y suavizado)	$0V$	···	$+Vs$
Voltaje de entrada diferencial	$0mV$	2-5mV	$+Vs$/Gain

Señal EMG RAW vs señal EMG rectificada y suavizada

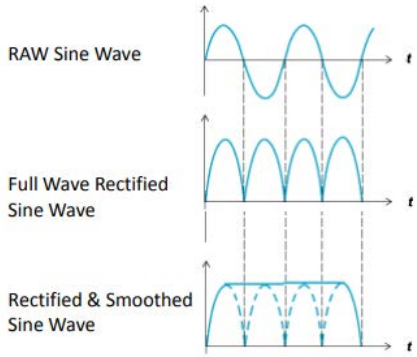


Fig. 4. Tipos de señales del sensor

3. METODOLOGÍA

El sistema de adquisición de señales electromiograficas se desarrolló mediante el software de arduino, se realizaron las pruebas para obtener las señales musculares necesarias, considerando que se cuenta con un monitor serial que permite visualizar los valores mínimos y máximos que se pueden alcanzar y así mismo la representación gráfica para el estudio posterior. El procedimiento llevado a cabo fue el siguiente:

1) Conexión de la fuente de alimentación Para la conexión de la fuente de alimentación se utilizo una fuente de voltaje, la cual cuenta con dos canales de salida, se

ISSN: 2992-8338

conectaron en serie las dos fuentes de manera que se obtuvo voltaje positivo (+Vs) , voltaje negativo (-Vs) y el común (GND). Se trabajó con un voltaje de 9V, requerido para el funcionamiento del sensor muscular. La conexión de la fuente con el sensor EMG se realizÓ de la siguiente manera: a. Conexión de la terminal positiva de la primera fuente de alimentación de 9V al pin +Vs del sensor. b. Se conectó el terminal negativa de la primera fuente de 9V a la terminal positiva de la segunda fuente de alimentación de 9V. Luego se conecto al pin GND del sensor. c. Conexión de la terminal negativa de la segunda fuente de alimentación de 9V al pin –Vs del sensor. En la Fig. 5 se muestra la conexión en físico de la fuente de alimentación.

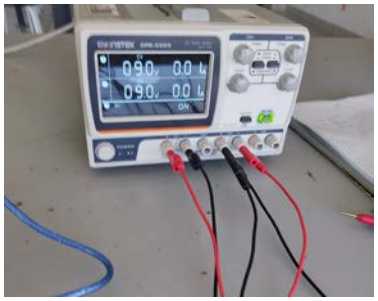


Fig. 5. Fuente de alimentación con salida de +Vs y -Vs

2) Colocación de los electrodos. En cuanto a la conexión de los electrodos primeramente se determinó el grupo de músculos con los cuales se desea trabajar (por ejemplo, bíceps, antebrazo, pantorrilla). Para este caso se trabajó con los músculos del antebrazo (Extensor común de los dedos, extensor cubital del carpo, abductor largo del pulgar) para obtener las señales electromiograficas, para ello se dio seguimiento a los siguientes pasos: a. Después de determinar a qué grupo de músculos se desea trabajar se limpia bien la piel. b. Se coloca un electrodo en el medio del cuerpo del músculo, el electrodo se conecta al conector a presión del cable rojo. c. Se coloca un segundo electrodo a un extremo del cuerpo del músculo y se conectó al conector del cable amarillo. d. Se coloca un tercer electrodo a una parte ósea o no muscular del cuerpo cerca del musculo objetivo. Se conecta este electrodo al conector del cable verde. En la Fig. 6 se muestra la colocación de los electrodos en el músculo.

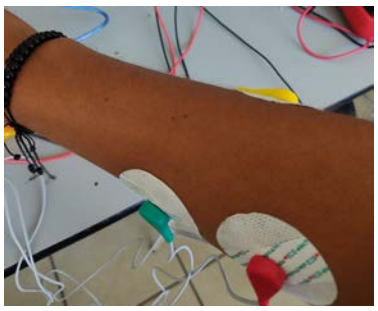


Fig. 6. Colocación de electrodos en el músculo

3) Conexión a un microcontrolador. Para la comunicación del sensor muscular con el microcontrolador se optó por utilizar una tarjeta arduino uno que hace la función de microcontrolador. Se tomaron en cuenta los siguientes pasos para la conexión: a. Se conectó el pin SIG del sensor muscular al pin analógico (A0) de arduino. b. Se conectó el pin GND del sensor a un pin GND de arduino. La Fig. 7 muestra la conexión de arduino con el sensor EMG.

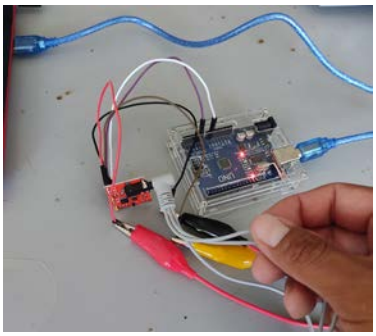


Fig. 7. Comunicación del sensor con arduino

4. RESULTADOS

Se utilizó el software de arduino para la adquisición de las señales, para ello se estructuró el código que se muestra a continuación con la finalidad de obtener los valores de salida que arroja el sensor EMG.

Fig. 8. Código para la comunicación serial

Posteriormente ya compilado el código, se realizó la comunicación serial en el programa de arduino, se obtuvieron los valores numéricos que se muestran en la Fig. 9.

Los resultados obtenidos en la primera prueba son; la comprobación de la funcionalidad de la comunicación del del sensor y el puerto serial, ya que se obtuvieron los valores de referencia de la dinámica muscular, considerando que los valores van aumentando o disminuyendo según la contracción del músculo, tenemos como punto de referencia un valor de 0 cuando el músculo esta en reposo y un punto máximo de 369 cuando el músculo se contrae con la fuerza máxima.

A continuación se pueden observar las gráficas cuando; A) el músculo está en reposo, Fig. 10. B) cuando el músculo

ISSN: 2992-8338

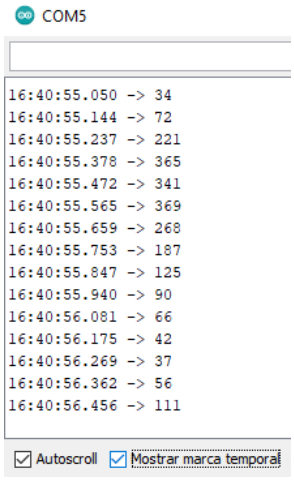


Fig. 9. Valores obtenidos por comunicación serial

está en un punto mínimo de contracción, Fig 11. C) cuando el músculo está en un punto máximo de contracción, Fig 12.

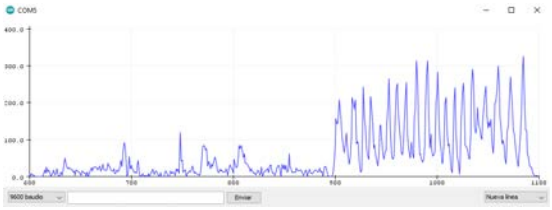


Fig. 10. A) Músculo en reposo

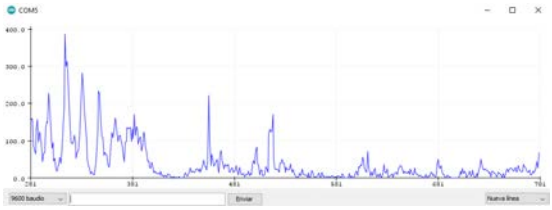


Fig. 11. B) Músculo en un punto mínimo de contracción

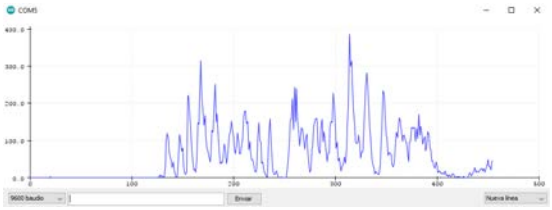


Fig. 12. C) Músculo en un punto máximo de contracción

4.1 Obtención de señales en Arduino y MATLAB

Como contribución Se obtuvo la comunicación mediante el puerto serial entre Matlab y la placa arduino, para graficar las señales obtenidas mediante el sistema de adquisición de señales, para almacenar los valores leídos, los cuales podrían servir para un posterior análisis. Los resultados del proceso de comunicación entre el sistema electrónico de adquisición de señales y el software de MATLAB se muestran en la Fig. 13.

```
int val;

void setup(){
Serial.begin(9600);
}

void loop(){
val=analogRead(A0);
Serial.println(val);
delay(100);
}
```

Fig. 13. Código de comunicación arduino - MATLAB

El proceso de configuración del programa en MATLAB para el tratamiento de las señales obtenidas, para fines de control o supervisión de la dinámica muscular, se muestra en la Fig. 14.

```
clear all;clc;

delete(instrfind({'Port'},{'COM11'}));
pserial=serial('COM11','BaudRate',9600);
fopen(pserial);

figure('Name','Gráfica de valores obtenidos')
title('LECTURA ANALOGICA CON ARDUINO');
xlabel('Nuestra');
ylabel('Voltaje de Salida');
val=zeros(1,1000);

for i=1:1000
    ylim([0 5.1]);
    xlim([i-100 i+10]);
    lectura=fscanf(pserial,'%d');
    val(i)=lectura*(5/1023);
    hold on
    plot(i,val(i),'x');
    drawnow
end

dlmwrite('Valores_Obtenidos.dat', val, 'delimiter', '\n', 'precision', '%.2f')

fclose(pserial);
delete(pserial);
clear all;
```

Fig. 14. Código en MATLAB para obtención de la gráfica

La gráfica que muestra los valores finales obtenidos, se muestra en la Fig. 15.

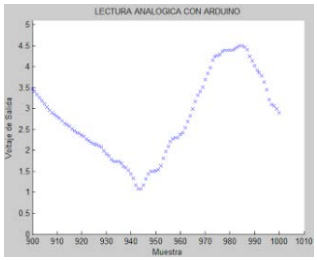


Fig. 15. Gráfica de la lectura analógica con arduino

5. CONCLUSIÓN

En conclusión, se logró el objetivo que fue la adquisición de las señales electromiograficas en MATLAB, dado que

ISSN: 2992-8338

para futuras investigaciones para control y supervisión a partir de la dinámica múscular, es necesario contar con un sistema que obtenga señales electromiográficas reales, que muestren el resultado de la instrucciones dadas mediante el software de control. La información se encuentra de manera digital tanto en software de Arduíno como en MATLAB, por lo cuál será posible realizar prácticas de aplicación con señales reales. Las principales ventajas respecto a otros trabajos realizados son el bajo costo y la facilidad de obtener un sistema de adquisición de señales electromiográficas que cumplan con el fin esperado que es obtención de las señales en Arduino y MATLAB, herramientas de software que potencializan el estudio de las señales y valores de medición obtenidos, para futuras aplicaciones. Por otra parte, las limitaciones se pueden ver reflejadas en cuanto a las características del sistema debido a que este proyecto se limita solo al estudio de los músculos del brazo a diferencia de trabajos anteriores que estudian también los movimientos de los dedos de la mano u otras partes del cuerpo. así como otro tipo de metodologías que están implementadas directamente en actuadores como un brazo robótico donde se toma en cuenta los grados de libertad o la cinemática del robot.

REFERENCES

Aviles, M.R. et al. (2020). Metodología basada en la transformada wavelet e indicadores estadísticos para la clasificación de señales electromiográficas aplicadas a un brazo robótico.

Betancourt, G.A., Suárez, E.G., and Franco, J.F. (2004). Reconocimiento de patrones de movimiento a partir de señales electromiográficas. *Scientia et technica*, 10(26), 53–58.

Caballero, K., Duque, L.M., Ceballos, S., Ramírez, J.C., and Peláez, A. (2002). Conceptos básicos para el análisis electromiográfico. *Ces Odontología*, 15(1), 41–50.

Cáceres Barra, C.E., Arévalo Arévalo, A.M., and Aravena Troncoso, V.E. (2018). *Relación entre los índices de fatiga de la musculatura extensora de columna y la cantidad de horas en posición sedente en estudiantes de la Universidad Católica de la Santísima Concepción: un estudio descriptivo*. Ph.D. thesis, Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Correa-Figueroa, J., Morales-Sánchez, E., Huerta-Ruelas, J., González-Barbosa, J., and Cárdenas-Pérez, C. (2016). Sistema de adquisición de señales semg para la detección de fatiga muscular. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 37(1), 17–27.

Skinner, S.A., Transfeldt, E.E., Mehbod, A.A., Mullan, J.C., and Perra, J.H. (2009). Electromyography detects mechanically-induced suprasegmental spinal motor tract injury: review of decompression at spinal cord level. *Clinical neurophysiology*, 120(4), 754–764.

Villarejo, J. (2007). Detección de la intención de movimiento durante la marcha a partir de señales electromiográficas.

Vladimir, B.V.F., Javier, M.C.M., Evgeny, A.V., Lukyanov, A., and Emanuel, M.P.L. (2018). Modelado y simulación del robot mitsubishi rv-2ja controlado mediante señales electromiográficas. *Enfoque UTE*, 9(2), 208–222.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 6, Núm. 2, Julio - Diciembre 2023
ISSN: 2992-8338

Attack detection scheme for a glucose-insulin system

Angel-R. Guadarrama-Estrada*, **Gloria-L. Osorio-Gordillo***, **Carlos-M. Astorga-Zaragoza***, **R.-A. Vargas Méndez***

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*

Abstract. This article presents an attack detection scheme based on a proportional-integral observer, which allows for identifying attack patterns aimed at the system's output. These patterns fall into the categories of Denial of Service (DoS) and Insertion of False Data (IDF) attacks, with the goal of impairing the proper functioning of a cyber-physical system, represented using the Takagi-Sugeno model. The detection scheme will be applied to a glucose-insulin system. Currently, medical monitoring systems are connected to the network for patient data acquisition, making them susceptible to various types of attacks by external agents seeking to harm the patient's life.

Keywords: Proportional-Integral Observer, Takagi-Sugeno System, Detection Scheme, Denial of Service of Data, Insertion of False Data, Cyber-Physical System, Glucose-Insulin System.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas ciber-físicos tienen diversas aplicaciones en campos tan variados como vehículos autónomos, sistemas de control vehicular, la industria 4.0, redes inteligentes y distribución de agua, destacándose entre ellos los sistemas de monitoreo médico (Altawy and Youssef, 2016; Dey et al., 2018). La conectividad y la implementación de estos sistemas ofrecen numerosas ventajas, ya que permiten a un paciente ser vigilado por varios especialistas para supervisar y controlar dispositivos médicos que garantizan la salud del paciente. Sin embargo, el uso de diversas arquitecturas de comunicación hace que estos sistemas sean susceptibles a ciber-ataques por parte de agentes externos (Januário et al., 2019). Esto puede resultar en consecuencias que van desde diagnósticos erróneos hasta, en casos más avanzados, la administración incorrecta de medicamentos para el paciente.

Un ciberataque se define como la intervención de un agente externo en un sistema con el propósito de alterar su funcionamiento en beneficio del atacante, ya sea para causar efectos adversos en el sistema o para pasar desapercibido frente a las medidas de protección (Wang et al., 2019; Li et al., 2018). En la literatura se han documentado diversos tipos de ataques, entre los que se incluyen la Denegación de Servicio (DoS) y la Inserción de Datos Falsos (IDF).

Un aspecto importante al abordar los ciber-ataques en sistemas ciber-físicos desde una perspectiva de control es la modelización de las señales de ataque como señales perjudiciales para la operación del sistema. Esto permite comprender en cierta medida su comportamiento y buscar formas de predecirlos y contrarrestarlos. En este caso, se incorporará la lógica de distribución Markoviana para simular un comportamiento más realista del ataque.

Las estructuras de Observadores proporcional integral (PIO) han sido una herramienta eficaz para detectar e identificar esquemas de fallas y algunos tipos de ataques en distintos tipos de sistemas. Su estructura comparada con estructuras más simples como el Luenberger o Proporcional (PO) , permite una precisión por los grados de libertad adicionales proporcionados por este tipo de estructura. El diseño de los PIO se basa en la resolución de desigualdades matriciales lineales (LMI), lo que les permite adaptarse a las características específicas del sistema y proporcionar una mayor precisión en la detección e identificación de ataques.

La representación de un sistema no lineal utilizando el enfoque Takagi-Sugeno (T-S), ha sido ampliamente utilizada en los últimos años, ya que muchos sistemas pueden ser representados de manera adecuada usando este enfoque, esta técnica funciona por medio de relaciones locales lineales de entrada-salida de un sistema no lineal (Dominguez-Lagunas et al., 2023). La principal propiedad de un modelo T-S es expresar la dinámica local de cada una de las no linealidades del sistema, delimitadas en una región propia.

El caso de estudio se enfocará en un modelo no lineal del sistema glucosa-insulina en pacientes con Diabetes Mellitus tipo 1 (DM-1). Este modelo se basa en el modelo mínimo de Bergman (Bergman et al., 1987; Flores Martínez and Osorio Gordillo, 2019), que se caracteriza por tener un solo compartimento de glucosa.

ISSN: 2992-8338

Además, se asume que la glucosa plasmática afecta la captación neta de glucosa a través de un compartimento remoto. El modelo mínimo de Bergman se utiliza para comprender el comportamiento de los niveles de glucosa en función de las mediciones de insulina, tomadas durante las concentraciones plasmáticas de glucosa e insulina durante una prueba de tolerancia a la glucosa intravenosa.

La principal contribución de este documento reside en el diseño del observador proporcional integral discreto, específicamente adaptado a las particularidades de los sistemas ciber-físicos. Este esquema se orienta a identificar dos tipos distintos de esquemas de ataques a los cuales el caso de estudio es susceptible. Este enfoque podría servir como punto de partida para desarrollar un esquema de control robusto que, además de detectar, permita contrarrestar los objetivos de los atacantes.

Notación. El símbolo A^T denota una matriz transpuesta $A.A^+$ la inversa de una matriz A. I y 0 son matrices identidad y con elementos cero de dimensiones apropiadas.

***Lema** 1.* (**Complemento de Schur**) Dada una matriz simétrica $\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}$, las siguientes tres condiciones son equivalentes:

(1) $S > 0$;
(2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^t S_{11}^{-1} S_{12} < 0$;
(3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T$

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considere un sistema no lineal bajo el marco de la representación T-S con la característica de los sistemas ciber-físicos, la cual consiste en que la entrada y salida del sistema se muestrean en momentos discretos de tiempo, quedando de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \sum_{i=1}^{\kappa} \mu_i(x(k))(A_i x(k)) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + \alpha F_1 a_s(k) \end{aligned} \tag{1}$$

donde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ es la entrada del sistema, $y(k) \in \mathbb{R}^p$ representa las variables de salida medidas, $a_s(k)\mathbb{R}^p$ son las señales de ataque dirigidas al sensor. $A_i \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p\times n}$, $F_1 \in \mathbb{R}^{n\times m}$, son matrices conocidas, $\mu_i(x(k))$ son las funciones de ponderación y κ es el número de modelos locales lineales, el cual es determinado por $\kappa = 2^s$, siendo s el número de no linealidades en el sistema y finalmente α es una señal Markoviana que representa el efecto del ataque.

Para poder realizar el diseño del observador, se asume que el sistema T-S cumple con la propiedad de observabilidad funcional.

$$\mathbf{rank}\left[\, C \;\; CA_i \;\; \ldots \;\; CA_i^{n-1} \,\right]^T = n \tag{2}$$

Se considera un observador de estructura proporcional integral para el sistema (1)

$$\zeta(k+1) = \sum_{i=1}^{\kappa} \mu_i(x(k))[N_i\zeta(k) + H_i v(k) + F_i y(k) + Ju(k)] \tag{3}$$

$$v(k+1) = y(k) - C\hat{x}(k) \tag{4}$$

$$\hat{x}(k) = P\zeta(k) + Qy(k) \tag{5}$$

donde $\zeta(k) \in \mathbb{R}^{q_0}$ representa el vector de estado del observador funcional, $v(k) \in \mathbb{R}^{q_1}$ es un vector auxiliar y $\hat{x}(k)$ es el vector de estimación del observador. N_i, H_i, F_i, J, P y Q son matrices desconocidas de dimensiones apropiadas a determinar.

Considere una matriz $T \in \mathbb{R}^{q_0\times n}$ para definir el vector de error transformado $\varepsilon(k) = \zeta(k) - Tx(k)$ de modo que la dinámica del error de estimación puede ser expresada como:

$$\begin{aligned} \varepsilon(k+1) = \sum_{i=1}^{\kappa} \mu_i(x(k))[N_i\varepsilon(k) + (N_iT + F_iC - TA_i)x(k) \\ + H_i v(k) + (J - TB)u(k)] \end{aligned} \tag{6}$$

usando la definición de $\varepsilon(k)$ en las ecuaciones (3) y (4), puede ser reescritas como:

$$v(k+1) = C[x(k) - \hat{x}(k)] \tag{7}$$

$$\hat{x}(k) = P\varepsilon(k) + (PT + QC)x(k) \tag{8}$$

Suponiendo que las siguientes condiciones se cumplen:

$$a)\;\; N_iT + F_iC - TA_i = 0 \qquad b)\;\; J = TB_i$$
$$c)\;\; T + QC = I$$

entonces la dinámica del error, formada por (6) y (7) puede ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{\kappa} \mu_i(x(k)) \underbrace{\begin{bmatrix} N_i & H_i \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbb{A}_i} \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ v(k) \end{bmatrix} \tag{9}$$

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

En esta sección llevaremos a cabo la parametrización de las condiciones $a) - c)$. Considere una matriz cualquiera de rango fila completo $\Sigma = \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}$.

La condición $c)$ puede ser escrita como:

$$[\, T \;\; Q \,]\, \Sigma = I_n \tag{10}$$

La solución particular de la ecuación (10) para obtener T es:

$$T = \underbrace{\Sigma^+ \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}}_{T_1} \tag{11}$$

La solución de Q es la siguiente:

$$Q = \underbrace{\Sigma^+ \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix}}_{Q_1} \tag{12}$$

ISSN: 2992-8338

Partiendo de la condición a) y considerando los valores de T y Q obtenidas en (11) y (12). Se tiene:

$$N_i = \underbrace{[N_iQ - F_i]}_{K_i} C + TA_i \tag{13}$$

Sustituyendo los valores de N_i en la ecuación (9):

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\dot{\varepsilon}(k)\\ \dot{v}(k)\end{bmatrix}}_{\dot{\varphi}(k)} = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(z) \underbrace{\begin{bmatrix}TA_i - K_iC & H_i\\ -C & 0\end{bmatrix}}_{\mathbb{A}_i} \underbrace{\begin{bmatrix}\varepsilon(k)\\ v(k)\end{bmatrix}}_{\varphi(k)} \tag{14}$$

Finalmente, agrupando las variables conocidas y desconocidas, se obtiene la siguiente ecuación donde $\Omega = \begin{bmatrix}I_n\\ 0\end{bmatrix}$:

$$\dot{\varphi}(k) = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(z) \left(\underbrace{\begin{bmatrix}TA_i & 0\\ -C & 0\end{bmatrix}}_{\mathbb{A}_{1i}} + \underbrace{\Omega \begin{bmatrix}K_i & H_i\end{bmatrix}}_{\mathbb{Y}_i} \underbrace{\begin{bmatrix}C & 0\\ 0 & I\end{bmatrix}}_{\mathbb{A}_2} \right) \varphi(t) \tag{15}$$

$$\dot{\varphi}(t) = \sum_{i=1}^{m} \mu_i(z)[\mathbb{A}_{1i} + \Omega\mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2]\varphi(k) \tag{16}$$

El siguiente paso es encontrar la matriz $\mathbb{Y}_i$ que asegure la estabilidad del observador (16).

En la siguiente sección, se aborda el análisis de estabilidad basado en el método de Lyapunov. Para lograrlo, se propone resolver un conjunto de desigualdades matriciales lineales (LMI) con el fin de obtener la matriz $\mathbb{Y}_i$.

3.1 Análisis de estabilidad del Observador

En esta sección se lleva a cabo el análisis de estabilidad de la dinámica del error de estimación de la Ecuación (16).

Demostración 1. Considere la siguiente función de Lyapunov:

$$V(\varphi(k)) = \varphi^T(k)X\varphi(k) > 0 \tag{17}$$

donde $X = \begin{bmatrix}X_1 & 0\\ 0 & X_2\end{bmatrix} > 0$, con $X_1 \in \mathbb{R}^{q_0 \times q_0}$ y $X_2 \in \mathbb{R}^{q_1 \times q_1}$.

La diferencia de $V(\varphi(k))$ a lo largo de la solución de (16) es

$$\begin{aligned}\Delta V(\varphi(k)) &= V(\varphi(k+1)) - V(\varphi(k))\\ &= \varphi^T(k+1)X\varphi(k+1) - \varphi^T(k)X\varphi(k)\end{aligned} \tag{18}$$

reemplazado $\varphi(k+1)$, se obtiene

$$\begin{aligned}\Delta V(\varphi(k)) = \sum_{i=1}^{\kappa} \mu_i(x(k))\varphi^T(k)[(\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2)^T X\\ (\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2) - X]\varphi(k)\end{aligned} \tag{19}$$

La desigualdad $\Delta V(\varphi(k)) < 0$ se cumple para todo $\varphi(k) \neq 0$ si y solo si

$$(\mathbb{A}_{i1} - \mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2)^T X(\mathbb{A}_{i1} - \mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2) - X < 0, \tag{20}$$

donde

$$\mathbb{A}_{1i}^T X\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{A}_2^T\mathbb{Y}_i X\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{A}_{1i}^T X\mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2 + \mathbb{A}_2\mathbb{Y}_i X\mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2 - X < 0 \tag{21}$$

$\forall i = [1, \ldots, \kappa]$. Utilizando el complemento de Schur en la desigualdad (20) se tiene

$$\begin{bmatrix}-X & (\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2)^T X\\ X(\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i\mathbb{A}_2) & -X\end{bmatrix} < 0 \tag{22}$$

4. FORMULACIÓN DE ESQUEMAS DE ATAQUE

En este apartado, se establecen los diversos enfoques de ataque que se analizan con el fin de afectar el adecuado desempeño del sistema ciber-físico elegido.

4.1 Ataques de denegación de servicio (DoS)

El objetivo de este tipo de esquema de ataque es impedir la transmisión de lectura de datos del sistema, por lo regular esta intromisión de señal puede ser lanzada mediante la interferencia de los canales de comunicación, saturación de paquetes de datos en la red o cancelación de las señales.

Los esquemas de ciber-ataques al sensor tiene la siguiente forma:

$$a_s(k) = -x(k) \tag{23}$$

Utilizando la ecuación del sistema (1) en conjunto con la ecuación del ataque tipo DoS (23) dirigido al sensor se obtiene:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= \sum_{i=1}^{\kappa} \mu_i(x(k))(A_ix(k)) + Bu(k)\\ y(k) &= Cx(k) - \alpha F_1x(k)\end{aligned} \tag{24}$$

donde $a_s(k) \in \mathbb{R}^m$ representa el ataque del sensor. A, B, C, F_1 son matrices constantes conocidas. $\alpha(k)$ se refiere a los procesos estocásticos Markovianos que toma valor de 0 y 1.

4.2 Ataque de inserción de dato falso

El propósito de este tipo de enfoque es perturbar la lectura del sensor, reemplazándola de manera que difiera de la señal real de lectura por alguna deseada por el atacante. Cuando el sistema (1) se ve afectado por el ataque de inyección de datos falsos (IDF), la ecuación del ciber-ataque tienen la siguiente forma:

$$a_s(k) = -x(k) + b_s(k) \tag{25}$$

donde $b_s(k)$ es un dato engañoso que el adversario intenta lanzar sobre el sensor. Sustituyendo la ecuación (25) en (1):

$$\begin{aligned}x(k+1) &= \sum_{i=1}^{\kappa} \mu_i(x(k))(A_ix(k)) + Bu(k)\\ y(k) &= Cx(k) - \alpha F_1x(k) + \alpha F_1b_s(k)\end{aligned} \tag{26}$$

ISSN: 2992-8338

5. CASO DE ESTUDIO

5.1 Sistema glucosa-Insulina paciente con DM-1

La representación matemática del sistema glucosa-insulina es fundamental en el control automático, permitiendo comprender y regular los niveles de glucosa en pacientes diabéticos. Esto es crucial para evitar complicaciones y desarrollar dispositivos médicos avanzados, como bombas de insulina y sistemas de monitorización continua de glucosa., como se muestra en la Figura 1.

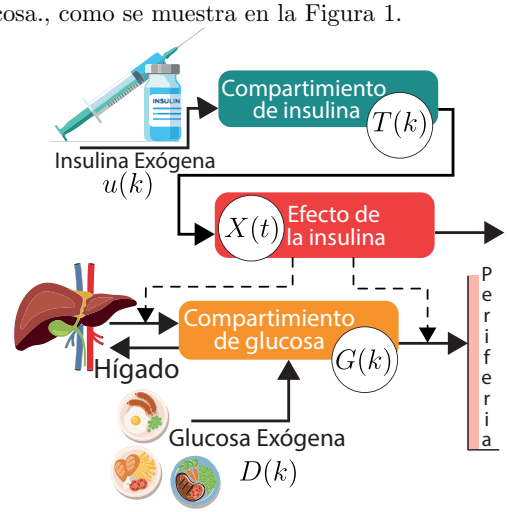


Figure 1. Esquema sistema glucosa-insulina paciente con DM-1.

El modelo no lineal en tiempo discreto que describe al paciente con DM-1 es el siguiente:

$$G_\Delta(k+1) = -p_1 G_\Delta(k) - X(k)[G_\Delta(k) + G_b] + D(k) \tag{27}$$

$$X(k+1) = -p_2 X(k) + p_3 I_\Delta(k) \tag{28}$$

$$I_\Delta(k+1) = -N[I_\Delta(k) + I_b] + \frac{u(k)}{V_I} \tag{29}$$

donde $D(k)$ y $U(k)$ son las tasas de infusión de glucosa e insulina, V_I es el volumen de distribución de insulina, N es la tasa de desaparición de insulina, $X(k)$ es el efecto de la insulina, $G_\Delta(k)$ y $I_\Delta(k)$ son las diferencias de concentración de glucosa e insulina en el plasma respectivamente, G_b y I_b son los valores basales de glucosa e insulina, p_1 es una tasa constante de absorción de glucosa en los tejidos, p_2 tasa constante de disminución de absorción de glucosa y p_3 tasa de aumento en la capacidad de absorción de glucosa.

$x(k) = \begin{bmatrix} G_\Delta(k) & X(k) & I_\Delta(k) \end{bmatrix}^T$, $w(k) = D(k)$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{V_I} \end{bmatrix}^T$, $\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -NI_b \end{bmatrix}^T$, $A(x(k)) = \begin{bmatrix} -p_1 & -(G_\Delta + G_b) & 0 \\ 0 & -p_2 & p_3 \\ 0 & 0 & -N \end{bmatrix}$,

$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Dw(k) + \Delta \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \tag{30}$$

Examinando el modelo no lineal del sistema (30) se puede identificar una variable de programación (no linealidad), la cual es:

$$\rho_1(k) = -(G_\Delta + G_b) \tag{31}$$

Los parámetros que se utilizaran para simular el caso de estudio están dados en la siguiente Tabla.

Table 1. Descripción de los parámetros

Parámetro	Valor	Definición
G_b	81 mg/dL	Valor basal concentración glucosa
I_b	2.5 mU/dL	Valor basal concentración insulina
p_1	0.05 min^{-1}	Tasa constante insulina en los tejidos
p_2	0.1 min^{-1}	Tasa constante disminución insulina
p_3	0.00065 $\frac{dL}{mU} min^2$	Tasa aumento absorción insulina
N	$5/54$ min^{-1}	Tasa desaparición insulina
V_I	$15, 19, 18$ g	Volumen de distribución insulina
B	0.05 dL	Cantidad de carbohidratos ingeridos

5.2 Formulación Takagi-Sugeno

La variable de programación $\rho_1(k)$ varía en una región acotada $\rho(k) = [\underline{\rho}, \overline{\rho}]$, donde $\underline{\rho}$ y $\overline{\rho}$ son el límite inferior y superior, obteniendo así la siguiente matriz:

$$A(\rho(k)) = \begin{bmatrix} -p_1 & \rho(k) & 0 \\ 0 & -p_2 & p_3 \\ 0 & 0 & -N \end{bmatrix} \tag{32}$$

Se utilizó una entrada de insulina exógena constante con valor de $u(k) = 27.7778\ mU/dL$ para determinar el rango de variación de $\rho(k)$ tales que:

$$\rho(t) : \begin{cases} \underline{\rho} = \min\left\{-(G_{\Delta+G_b})\right\} = -220.6741 \\ \overline{\rho} = \max\left\{-(G_{\Delta+G_b})\right\} = -81 \end{cases} \tag{33}$$

Debido a que el sistema $s = 1$ variables de programación, entonces se obtienen $\kappa = 2^s = 2$ funciones de ponderación, las cuales son:

$$n_0^1 = \frac{\overline{\rho} - \rho(k)}{\overline{\rho} - \underline{\rho}}, \qquad n_1^1 = 1 - n_0^1 \tag{34}$$

En este caso el número de funciones de membresía son $\kappa = 2$, siendo

$$\mu_1(\rho) = n_0^1, \qquad \mu_2(\rho) = n_1^1 \tag{35}$$

Teniendo en cuenta estos conjuntos difusos, el modelo T-S tiene 2 reglas. Entonces el límite inferior y superior de ρ son reemplazados por las variables de programación en la matriz $A(\rho(t))$. Resultando los siguientes modelos locales:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -p_1 & \underline{\rho} & 0 \\ 0 & -p_2 & p_3 \\ 0 & 0 & -N \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} -p_1 & \overline{\rho} & 0 \\ 0 & -p_2 & p_3 \\ 0 & 0 & -N \end{bmatrix} \tag{36}$$

Finalmente, el modelo T-S que representa la dinámica del modelo es:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= [\mu_1(\rho(k))A_1 + \mu_2(\rho(k))A_2]\, x(k) + Bu(k) \\ y(k) &= x(k) \end{aligned} \tag{37}$$

donde

$$A_1 = A(\underline{\rho}), \qquad A_2 = A(\overline{\rho})$$

ISSN: 2992-8338

El modelo matemático T-S del sistema glucosa insulina con ataque en el actuador, puede ser escrito como:

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^{2} \mu_i(\rho(k)) + (A_i x(k)) + Bu(k) + Dw(k) + \Delta$$
$$y(k) = Cx(k) + \alpha F_1 a_a(k) \tag{38}$$

Considerando una entrada de $u(k) = 27.7778\ mU/dL$ y los valores de la Tabla 1 así como un tiempo $T_d = 0.01$ y un paso de integración de $T_i = 0.001$. Adicionalmente el sistema contara con perturbaciones, esta perturbación representa tres comidas en el transcurso del día (desayuno, comida, cena). Tendiendo la primera en el minuto 420 la segunda en el 720 y finalmente la cenal al minuto 1140 en la Figura 2 se pueden observar dichas perturbaciones.

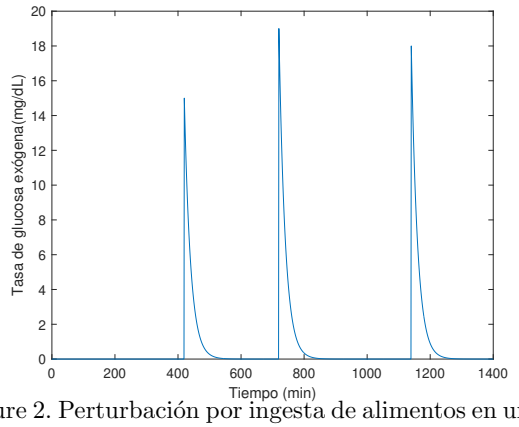


Figure 2. Perturbación por ingesta de alimentos en un día.

En la Figura 3 se observan las comparaciones entre los estados del sistema no lineal y su representación T-S discreto de la salida y_1 equivalente a la concentración de la glucosa. Las señales de color rojo representan al sistema no lineal, las líneas de color negro representan el comportamiento de los estados del modelo T-S discreto.

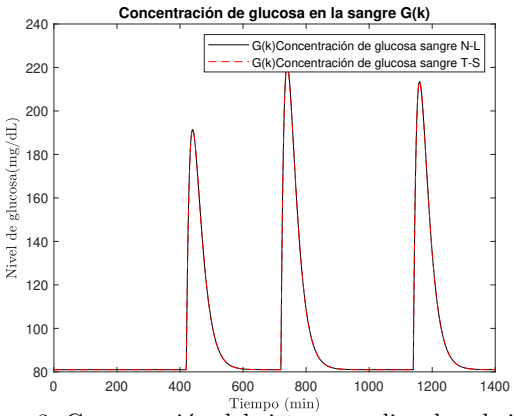


Figure 3. Comparación del sistema no lineal y el sistema T-S discreto

En la Figura 4 se muestran las funciones de pertenencia del sistema T-S. En este caso la variable programada $\rho(k)$ depende de la variación de $G_\Delta(k)$, la cual se ve directamente afectada por la perturbación de ingesta de alimentos marcados en la Tabla 1, es por ello que podemos ver la interpolación de los dos sub-modelos a lo largo del tiempo.

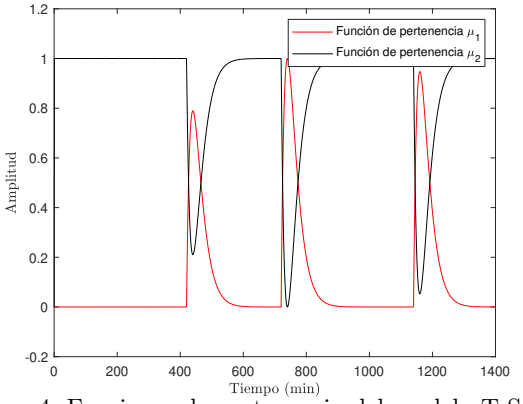


Figure 4. Funciones de pertenencia del modelo T-S μ_1 y μ_2

6. RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados de la simulación del sistema glucosa-insulina bajo diferentes esquemas de ataque y la estimación de sus estados. Comenzaremos por la estimación de los tres estados y posteriormente verificaremos el comportamiento del sistema ante el ataque tipo DoS con lógica uniforme como única simulación debido al espació disponible pero todas las simulaciones adicionales se podrán verificar en la Tablas 2 y 3 que equivale a los residuos generados por el observador.

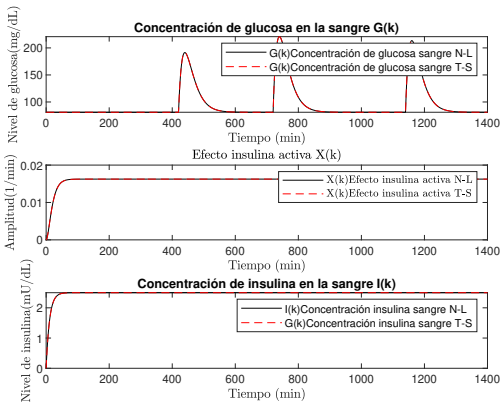


Figure 5. Estimación de los estados del sistema

En la Figura 5 se pueden observar las estimaciones de los tres estados del sistema $G(k)$ concentración de glucosa en la sangre, $X(k)$ efecto insulina activa y $I(k)$ Concentración de insulina en la sangre I(k).

ISSN: 2992-8338

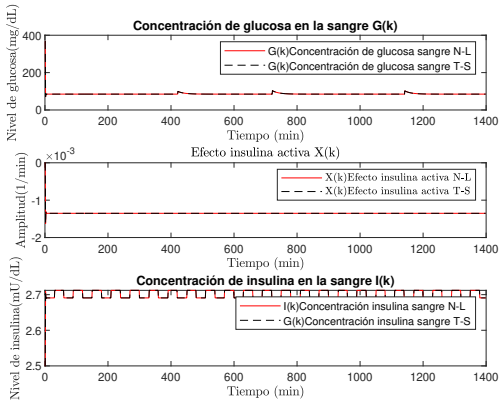


Figure 6. Salidas con ataque tipo DoS uniforme

En la Figura 6 se puede observar el efecto del esquema de ataque tipo DoS con una lógica de distribución Markoviana tipo uniforme, cuyo objetivo es provocar la incorrecta adquisición de datos del paciente por parte del dispositivo médico.

Table 2. Tabla residuos ataques tipo IDF

	Uniforme						
	Ataque tipo IDF						
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	-	-	0	-
r_2	0	+	0	+	0	+	+
r_3	0	0	-	0	+	-	-
	No Uniforme						
	Ataque tipo IDF						
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	-	-	0	-
r_2	+	0	0	+	0	+	+
r_3	0	0	-	0	-	-	-

Si bien los residuos generados en la Tabla 2 y Tabla 3 nos permiten identificar combinaciones de ataques a distintas salidas del sistema y en la mayoría de los casos poder distinguir entre esquema de ataque tipo DoS e IDF no permite obtener información de la diferencia entre lógica de ataque uniforme o no uniforme.

7. CONCLUSIONES

En este artículo, se propuso la implementación de un observador de tipo proporcional integral con el propósito de estimar los estados no medibles del sistema. Además, este observador permite detectar posibles esquemas de ataque en la salida del sistema. Se utilizó un sistema de glucosa insulina en tiempo discreto como caso de estudio. Los resultados revelaron que este tipo de observador proporciona una estimación precisa de los estados y genera residuos que pueden identificar la presencia de ataques en los sensores.

Table 3. Tabla residuos ataques tipo DoS

	Uniforme						
	Ataque tipo DoS						
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	-	-	0	-
r_2	0	-	0	-	0	-	-
r_3	0	0	-	0	-	-	-
	No Uniforme						
	Ataque tipo DoS						
	x_1	x_2	x_3	x_1, x_2	x_1, x_3	x_2, x_3	x_1, x_2, x_3
r_1	-	0	0	-	-	0	-
r_2	0	-	0	-	0	-	-
r_3	0	0	-	0	-	-	-

Sin embargo, dada la complejidad de los esquemas de ataque planteados, es necesario diseñar un esquema de diagnóstico más avanzado que permita obtener información adicional sobre estos esquemas, incluyendo su estimación, localización y aislamiento. Esto resalta la importancia de buscar y desarrollar técnicas más sofisticadas. El presente artículo sienta las bases para futuros trabajos de investigación orientados hacia la creación de esquemas de diagnóstico aún más avanzados y efectivos.

REFERENCES

Altawy, R. and Youssef, A.M. (2016). Security tradeoffs in cyber physical systems: A case study survey on implantable medical devices. *IEEE Access*, 4, 959–979.

Bergman, R.N., Prager, R., Volund, A., and Olefsky, J.M. (1987). Equivalence of the insulin sensitivity index in man derived by the minimal model method and the euglycemic glucose clamp. *J Clin Invest*, 79(3), 790–800. doi:10.1172/JCI112886.

Dey, N., Ashour, A., and Shi, F. (2018). Medical cyber-physical systems: A survey. *J Med Syst*, 42. doi:10.1007/s10916-018-0921-x.

Dominguez-Lagunas, E., Osorio-Gordillo, G.L., and Guadarrama-Estrada, A.R. (2023). Proportional integral observer-based controller for an h2at system under the takagi-sugeno representation. In *Memorias del 2023 Congreso Nacional de Control Automático*. AMCA, Acapulco, Guerrero, México.

Flores Martínez, M.A. and Osorio Gordillo, G.L. (2019). *Diseño de una ley de control basada en observadores funcionales para la regulación de glucosa insulina utilizando el enfoque Takagi-Sugeno*. Master's thesis, Tecnológico Nacional de México, CENIDET.

Januário, F., Cardoso, A., and Gil, P. (2019). A distributed multi-agent framework for resilience enhancement in cyber-physical systems. *IEEE Access*, 7, 31342–31357. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903629.

Li, H., He, X., Zhang, Y., and Guan, W. (2018). Attack detection in cyber-physical systems using particle filter: An illustration on three-tank system. In *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 504–509. doi: 10.1109/CYBER.2018.8688281.

Wang, Z., Li, L., Sun, H., Zhu, C., and Xu, X. (2019). Dynamic output feedback control of cyber-physical systems under dos attacks. volume 7, 181032–181040. doi:10.1109/ACCESS.2019.2959083.

ISSN: 2992-8338

Robotic orthesis for hand rehabilitation

A.M.P. Castillo – González, J.D. Paz – González, M. Castillo – Núñez, C. Morales – Morales, J.A. Solís – Peniche, A. Hernández – Villeda, C.X. Cervantes – Olvera, M.B. Loaeza – Calvillo

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, 76800 San Juan del Río, Querétaro

Abstract: This paper presents the preliminary results of the development of an orthosis as an aid in hand rehabilitation for people who have suffered a trauma or stroke and as a result have been compromised the strength and movement of the hand. A system elaborated with 3D printing and an electronic control is proposed to control and help in the movements of the affected phalanges using servomotors and artificial tendons from signals obtained from EMG sensors that capture the movements or contraction of the muscles to determine the degree of support of the system towards the hand with movements and pre-programmed forces according to the needs of the patients.

Keywords: Orthesis, Robotic, rehabilitation.

1. INTRODUCTION

La mano es una parte del cuerpo vulnerable al estar expuesta y visible, por ello, el riesgo de sufrir lesiones es alto, en relación con otras partes del cuerpo, lo que implica la merma en la calidad de vida de quién padece algún accidente que afecte la fuerza o su movilidad. La pérdida de movilidad en la mano se genera a partir de sufrir algún trauma, lesión o accidente cerebrovascular (ECV), provocando que el paciente pierda la movilidad, dada por situaciones de: fracturas (huesos rotos), ruptura de ligamentos, dislocaciones, osteoartritis, tendinitis.

En cuanto a las lesiones por fracturas, las manos son vulnerables a este tipo de traumatismos por ejemplo en los accidentes de trabajo en el 26% de los casos las manos resultan traumatizadas (Secretaría de Salud, 2017). Sin embargo, los accidentes que afectan la movilidad de las manos no solo se dan en el ambiente laboral, sino en el hogar, deportes o accidentes automovilísticos con base en los datos del Instituto Mexicano del Seguro Social, son 60% de los traumatismos de mano. Tienen una incidencia de 15 por 1,000 personas al año siendo la causa de una de cada tres incapacidades (García-Martínez et al., 2019).

"Las fracturas de la mano representan un 10% de todas las fracturas; cerca del 70% se producen entre los 11 y 45 años y son causadas principalmente por caídas, accidentes laborales, accidentes de tránsito y actos de violencia" (Gómez, J. Rendón, 2019).

Las lesiones prolongadas son un tema de salud mundial que afecta las capacidades motoras. La frecuencia global en algunos países vecinos como es Colombia llegan casos de emergencia y urgencia los cuales el 70% son personas con lesiones, en dicho país el trauma ocupa primer puesto con 40.4% Chuquimbalqui (2022).

Otra causa que puede generar pérdida de la movilidad y fuerza en las manos es la secuela de un Accidente cerebrovascular "Según la Asociación Americana del Corazón (AHA por sus siglas en inglés), entre los 64 sobrevivientes del ECV mayores de 65 años, el 50% de ellos quedan con algún tipo de parálisis y el 26% son dependientes en actividades de la vida diaria" (Huamanchahua et al. ,2020).

Al sufrir alguna lesión, trauma o accidente cerebrovascular que afecte la movilidad de la mano, el paciente necesita buscar la rehabilitación para poder evitar el incremento de la discapacidad, es por ello que el tratamiento suele ser costoso y muy lenta la rehabilitación ya que con dicha rehabilitación se busca que el afectado pueda de nuevo adaptarse a sus actividades diarias.

La rehabilitación se torna un elemento importante para volver a contar con funcionalidad en la mano, para ello se utilizan varias técnicas que tienen como objetivo mejorar la extensión, flexión y agarre. Algunas de estas técnicas son masajes y ejercicios que se llevan a cabo junto con el fisioterapeuta (Díaz, 2017)

La rehabilitación está estrechamente relacionada con la funcionalidad y calidad de vida de la persona afectada. Esta rehabilitación se puede dar de varias formas como masajes, ejercicios entre otros. Se han desarrollado órtesis de mano con la finalidad de contribuir en la recuperación, estos exoesqueletos se han desarrollado usando neumática, hidráulica, o cables (Huamanchahua et al., 2020)

El uso de una órtesis sirve de apoyo para la rehabilitación del paciente, esta rehabilitación es conocida como neurorehabilitación la cual logra hacer más eficaz el tratamiento e incluso menos largo el tiempo de rehabilitación, Actualmente la órtesis busca ser más rápida en la recuperación del paciente, es por ello que se centra en trabajar con un mecanismo neuronal el cual se basa en entrenamientos repetitivos para que la mano comience a recuperar su capacidad motriz, todo esto a través de tecnología que se adapta a la necesidad del paciente.

El uso de órtesis robótica para apoyo a la rehabilitación presenta la ventaja de aprovechar la "precisión que tiene un robot en poder aumentar gradualmente la velocidad en las repeticiones de una secuencia, la extensión de la posición

ISSN: 2992-8338

articular, la resistencia o fuerza de oposición de un ejercicio de aumento de fuerza, etc." (López, R., Torres, et al., 2014).

La órtesis robótica de mano representa una solución en el campo de la rehabilitación y la asistencia médica. Al combinar los avances en la ingeniería robótica con el conocimiento de la anatomía y biomecánica de la mano humana, esta tecnología ofrece un enfoque personalizado y altamente funcional para mejorar la calidad de vida de los individuos con alguna problemática motora.

1.1 Fisiología de la mano

La mano está compuesta principalmente por 27 huesos, más de 20 articulaciones y más de 30 músculos, en la cual se juntan los tejidos blandos y duros al mismo tiempo, que gracias a ellos podemos realizar innumerables movimientos y destrezas. La mano es un miembro importante en la parte del cuerpo humano ya que este nos proporciona orientación, posición y estabilidad para poder realizar actividades como manipulación, comunicación y fuerzas diarias.

La mano cuenta con una estructura perfectamente lógica la cual permite crear un sin fin de posibilidades, posturas y movimientos que se pueden adaptar a la movilización y organización del ser humano, ver Fig. 1. Es un medio que sirve para que el ser humano logre interactuar con su entorno, el cual le ayuda a comprender mejor el contexto donde se encuentra; cuando una persona llega a tener una fractura en la mano le causa un daño motor a la mano dificultando interactuar con su entorno debido a la falta de movilidad que puede lograr con el miembro afectado.

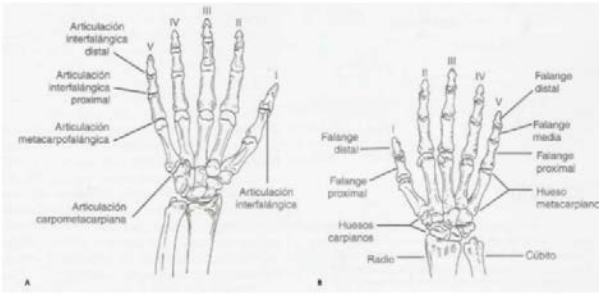


Figura 1 Estructura de la mano, Atemoztli, D. L. (2020).

1.2 Beneficios de uso de órtesis

Uno de los problemas a las que se enfrentan las personas que por alguna causa han perdido movilidad y/o fuerza en los dedos de la mano es que el proceso de fisioterapia puede ser muy lento y para los terapeutas implica entre otras cosas, el que tener que dedicar tiempo exclusivo a estos pacientes sin poder atender a otras personas, además de que el proceso al ser personalizado puede ser lento y costoso.

El uso de órtesis robótica auxiliar en la rehabilitación se apoya en:

- Disminuir el tiempo presencial con el fisioterapeuta
- Horarios flexibles para realizar la terapia.
- El tiempo de rehabilitación disminuye

El uso de órtesis robótica para apoyo a la rehabilitación presenta la ventaja de aprovechar la "precisión que tiene un robot en poder aumentar gradualmente la velocidad en las repeticiones de una secuencia, la extensión de la posición articular, la resistencia o fuerza de oposición de un ejercicio de aumento de fuerza, etc." (López, R., Torres, et al., 2014).

Las órtesis para apoyo a rehabilitación de mano se han desarrollado con la finalidad de apoyar el proceso de recuperación de los pacientes, algunos trabajos se centran en el uso de señales musculares o se concentran en las articulaciones de hombro y cuello, o que controlan el ángulo de flexión/ extensión de los dedos (Albornoz et al 2019).

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del prototipo se clasifica en tres etapas: antecedentes, diseño y ensamble y pruebas, basado en el nivel de madurez tecnológica (sus siglas en inglés TLR).

2.1 Antecedentes

La investigación fue realizada a través de entrevistas a pacientes con síntomas de traumatismo en la mano y fisioterapeutas; con el objetivo de entender la problemática desde el contexto profesional encargado de la rehabilitación de la mano por pérdida de movilidad a consecuencia de algún traumatismo, o accidente cerebral vascular.

El desarrollo de la órtesis robóticas se encuentra referenciado desde los años ochenta, siendo Colombia el país latinoamericano que mayor referencia aporta en aplicación y patentamiento. El estudio de exoesqueleto EMMRA-117 y la órtesis robótica PRO-Dix II (Gómez et al. 2019) y la "órtesis robótica para rehabilitación de mano y muñeca" que complementa la terapia física facilitando la movilización pasiva temprana en caso de lesiones tempranas en caso de lesiones traumáticas y asistiendo la movilización activa en caso de enfermedades crónicas (OMPI, 2019).

2.2 Diseño y ensamble

La implementación de sensores hápticos y tecnología de retroalimentación han permitido que las órtesis proporcionen una interacción intuitiva y natural con el usuario, facilitando el proceso de aprendizaje y control. El diseño de la órtesis fue realizado en SolidWorks 2018, a partir del diseño de cada dedo con movimientos independientes, montando las piezas en un guante cuyas falanges fueron impresas en un equipo 3D. Los movimientos de cada uno de los dedos deben de ser libres a fin de que tengan un movimiento normal y puedan agarrar distintos objetos cuando no se está ejerciendo ayuda para su movimiento, en el momento de la rehabilitación, se programarán movimientos a diferentes fuerzas según sea la terapia que requiere el paciente.

A partir de un sensor de flexión, ver Fig. 2, se obtiene una señal, la cual es amplificada, filtrada y posteriormente entra a un sistema de microcontrolador; así los movimientos de cada dedo son controlados y apoyados según la necesidad de cada persona para su rehabilitación, controlando la fuerza para la sujeción de objetos.

ISSN: 2992-8338

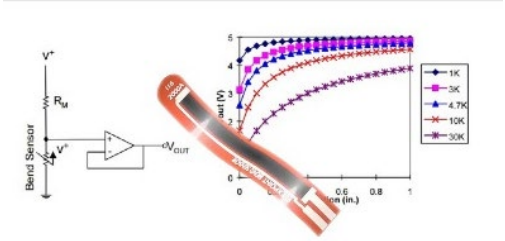


Figura 2. Sensor de flexión

Con la señal que proviene de un sensor EMG de pulsos cardiacos, ver Fig. 3, se monitorean las contracciones musculares para que el sistema apoye en el movimiento de abrir y cerrar cada uno de los dedos o la mano completa. Cuando la persona genere una pequeña fuerza para mover la mano, el sensor capta la señal y esta se procesa con circuitos de amplificadores operacionales y capacitores para filtrar las señales y éstas queden libres de ruido y no afecten al circuito de control.

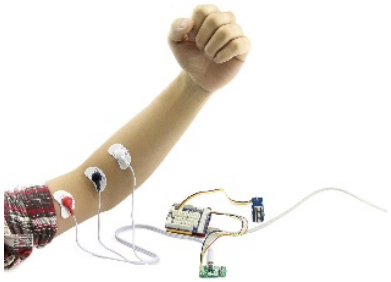


Figura 3 Sensor EMG

Las piezas serán construidas con plástico PLA, el cual es un material resistente y flexible que soporta los rayos ultravioletas y presenta una baja inflamabilidad, además de ser de baja densidad y fácil de procesar y manipular, también se utilizará una lycra micro porosa para la respiración de la mano y evitar contacto directo con las partes mecánicas del aparato.

Se parte de que cada dedo debe ejercer una fuerza de 1.8 Kg/cm, ver Fig. 4, se utilizará como alimentación del sistema una batería que mantenga la energía por dos horas.

Para optimizar la rehabilitación sin que esté presente el terapeuta de manera presencial, el sistema podrá conectarse a una red WIFI y así monitorear la rehabilitación de manera remota, para esto se utilizará un microprocesador ESP32 que tiene la posibilidad de conectarse a la red WIFI.

La programación del microcontrolador se realizó mediante el portal Arduino Ide en lenguaje C++.

Se programarán una serie de movimientos indicados por personal especializado en terapias y éstos pueden ser modificados según el avance de cada paciente. Los dedos podrán tener movimientos entre 15 y 90 grados y tendrán una fuerza de hasta 8 Kg.

Figura 4. Prototipo propuesto

2.3 Pruebas

Las pruebas de movimiento, extensión y flexión del dedo se muestran en la Fig. 5, para asegurar la precisión y coordinación de cada dedo con la finalidad de identificar que el movimiento sea fluido y adaptativo. Así mismo, se realizaron pruebas de monitoreo de pulsos con los electrodos, tal como se presenta en la Fig. 6.

Figura 5. Pruebas de movimiento

Figura 6. Pruebas de monitoreo de pulso

ISSN: 2992-8338

3. RESULTADOS

El desarrollo de la propuesta órtesis de mano en su versión final es como se muestra en la figura 7.

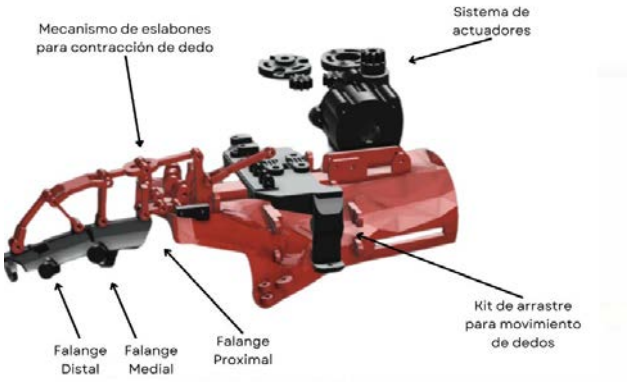


Fig. 7 Propuesta de ortesis de mano.

A partir de la propuesta se pretende realizar análisis cinemático directo y de esfuerzo para determinar con precisión la posición y velocidad a la que debe trabajar la órtesis de mano.

4. CONCLUSIONES

La órtesis de mano representa una solución en el campo de la rehabilitación y asistencia médica, la cual combina los avances de la ingeniería robótica con el conocimiento de la anatomía y biomecánica de la mano humana, ofreciendo un enfoque personalizado y funcional para mejorar la calidad de vida de los individuos con problema de movilidad en la mano debido a traumatismo o accidentes cerebrovascular.

La idea de la propuesta es que sea capaz de adaptarse de manera personalizada a diversos pacientes para atender sus necesidades específicas y rehabilitación requerida reduciendo tiempo e incrementando los resultados.

No obstante, es importante destacar que, la propuesta de órtesis de mano enfrenta desafíos técnicos y clínicos. Entre ellos se encuentran la miniaturización de componentes, análisis cinemático, análisis del material, optimización de energía, flexibilidad en la personalización y garantía de los resultados con el paciente.

REFERENCES

Atemoztli, d. L. (2020). Instrumentación y control de un prototipo de exoesqueleto para mano en rehabilitación. Huajuapan de león: 2020.

Tepán, X. L. A., Mendieta, J. D. F., Ochoa, J. M. G., Cárdenas, J. H. H., Zúñiga, L. F. M., Guzmán, R. S. Z., & Tola, E. M. (2019). Órtesis robótica para rehabilitación bilateral de mano izquierda para pacientes con hemiplejia. I+ T+ C-Research, Technology and Science, 1(13), 10-15.

Robotic orthosis for bilateral rehabilitation of left hand for patients with hemiplegia. Revista I+T+C-Investigación, Tecnología y Ciencia. 13(1), 10-15.

Chuquimbalqui, V. (2022). Diseño de una ortesis para miembro superior con estimulación eléctrica funcional para mejorar el movimiento en pacientes con lesiones prolongadas. Chiclayo: 2022

Diaz, M. (2017). Plan de intervención de fisioterapia en mano traumática. A propósito de un caso. [Trabajo de fin de grado]. Universidad de Zaragoza

García-Martínez, I., Fernández-Álvarez, U., Fernández-Ardura, T., Fernández-García, A., De Juan-Marín, M., & Pérez-Arias, A. (2019). Revisión del diagnóstico de mano catastrófica a lo largo de 15 años en un hospital terciario: ¿hacemos un uso adecuado del término? Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología.

Gómez-Rendón José Fernando, M.-A. J.-H.-V.-G. (2019). Rehabilitación de fracturas de mano con. Manizales, Colombia: 2019.

Huamanchahua, D., Heredia, K., Huanay, L., & Pérez, A. (2020). Diseño de un guante terapéutico (exoesqueleto de mano) con control independiente de cada dedo para rehabilitación motora de extensión y flexión para personas con artritis y ACV. Investigaciones para Ingeniería Biomédica y Bioingeniería, 63-68.

Instituto Mexicano del Seguro Social (2019). Recomiendan especialistas del IMSS proteger las manos para prevenir accidentes y daños irreversibles. http://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201906/156

López, R., Torres, J., Salazar, S., & Lozano, R. (2014). Desarrollo de un exoesqueleto para rehabilitación de tobillo y rodilla. Revista mexicana de ingeniería biomédica, 35(1), 13-28.

Secretaría de Salud. (2017, 17 mayo). 26 por ciento de accidentes laborales, son en muñecas y manos. Recuperado 24 de julio de 2023, de https://www.salud.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/26-por-ciento-de-accidentes-laborales-son-en-muñecas-y-manos-armando-ahued.

Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2018036571

SOBERANÍA ENERGÉTICA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Bladeless wind turbines, an alternative for wind energy generation

Jazmín Sarahí Jiménez Ramos[*], D. Hernández-Castañeda[*], J.F. Gómez-Aguilar[**]

[*]Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Int. Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.

[**]CONAHCyT - Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Int. Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. {m23ce032, daniela.hc, jose.ga }@cenidet.tecnm.mx

Abstrac: This article describes the operation of a new innovative technology of second-generation bladeless wind turbines capable of obtaining electrical energy on small scales. This type of wind turbines operates under an aerodynamic effect called vortex shedding which generates an oscillating flow when the air flows against a cylinder made of carbon fiber and fiberglass. When these oscillations coincide with the natural frequencies of the system, it comes into operation. The resonance and oscillation allowing transform mechanical energy to electricity through an alternator made up of a coil and a magnet. Due to its advantages in design and construction over conventional wind turbines, this second generation wind turbine can be the ideal complement along with the installation of solar panels for the collection of small-scale electrical energy and its potential use in residences, parks, among other.

Keywords: Renewable energy, bladeless wind turbine, aerodynamic loads, vortex theory, wind energy, resonances.

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energías renovables surgen como alternativa al uso de los combustibles fósiles, debido a la limitada cantidad de este recurso, las fuentes alternas de energía han tomado una gran presencia hoy en día.

Entre las diferentes energías renovables encontramos la energía eólica, solar, geotérmica, hidráulica (Panwar et al., 2011). La energía eólica es una fuente ilimitada de energía renovable la cual no daña el medio ambiente, debido a ello tiene un gran impacto en el estudio y desarrollo de tecnologías a nivel mundial. La energía eólica es aquella que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad y cuya principal forma de obtención son los aerogeneradores (Herbert et al., 2007). En los últimos años, los aerogeneradores han ido evolucionando a pasos agigantados, un diseño de gran interés en la comunidad científica es el aerogenerador sin aspas (ASA). Este tipo de aerogenerador consiste en un cilindro que oscila en un rango de velocidades de viento, de acuerdo al diseño, opera bajo un efecto aerodinámico denominado desprendimiento de vórtices generando un flujo oscilante cuándo el aire fluye contra el cilindro, lo cual provoca que el cilindro oscile en un rango de velocidad de viento, que posteriormente transforma la energía mecánica en electricidad mediante un alternador que dispone de imanes y bobinas para generar electricidad.

La generación de energía eólica se ha convertido en una de las energías limpias cuyo uso será una solución viable al calentamiento global y a los cortes de suministro eléctrico (Agnihotri et al., 2022)**.** Se considera la electrificación de zonas rurales y se opera combinando energía eólica sin aspas y el sistema fotovoltaico (Prasad et al., 2022).

El nuevo diseño de aerogeneradores sin rodamientos, engranajes y cuyos requisitos de mantenimiento podrían reducirse. El dispositivo consta de único componente estructural y su fabricación, transporte, almacenamiento e instalación presenta varias ventajas (Herrero-Olarte, 2018). Los aerogeneradores convencionales necesitan renovarse y ser renovados en su diseño, por lo cual se desarrolla un aerogenerador sin aspas y un aerogenerador eléctrico basado en la acción giroscópica que se acoplara para generar electricidad (Yazdi, E. A. 2018).

1.1 Diseño de los aerogeneradores sin aspas

El diseño y análisis de este tipo de aerogeneradores, se han basado en modelos y simulaciones computacionales, originando prototipos en laboratorios especializados, estas pruebas incluyen el control de flujo, mejoras en eficiencia, modelos paramétricos, entre otros *(Hameed* et al., 2009), (Zhao et al., 2022).

Los ASA pueden ser considerados básicamente un cilindro que oscila y vibra en respuesta a los vórtices que se originan en el viento y los cuales pasan a través de este. La **Figura 1** muestra la geometría y estructura de este tipo de aerogenerador.

ISSN: 2992-8338

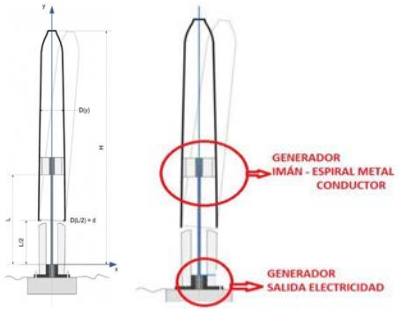


Figura 1. Geometría y Estructura del ASA.

Es fundamental para la operación de los ASA el estudio mecánico sobre su diseño y análisis. En diferentes estudios se han reportado análisis aerodinámicos *(Sabab and Mohd,* 2021) utilizando software de dinámica de fluidos para la obtención de diseños óptimos, análisis de deformaciones y esfuerzos (Buela et al., 2021), desplazamientos y frecuencias de acuerdo a las dimensiones del ASA *(Francis et al., 2021), (Aher* et al., 2021), análisis de vibraciones (Agnihotri et al., 2022), efectos de fuerza de resistencia o fricción al fluido*(Maftouni et al.,*2021), entre otros. Las investigaciones en torno a los ASA incluyen el modelado eléctrico y estimación de máxima potencia obtenida de acuerdo a las condiciones de viento (Bhardwaj and Teja, 2021).

2. EVOLUCIÓN EN EL CONCEPTO EOLICO.

El nuevo diseño de los ASA no considera rodamientos, engranajes, aspas, y debido a ellos, los requisitos de mantenimiento pueden reducirse, lo cual redundará en una vida útil superior a la de los aerogeneradores convencionales. Este nuevo diseño consta de un único componente estructural y su fabricación, almacenamiento, transporte e instalación presenta claras ventajas con respecto a los aerogeneradores convencionales (Mane et al., 2017). Este novedoso diseño reduce el uso de materias primas y la necesidad de una cimentación importante.

2.1 Clasificación de los ASA

En España la empresa *Vortex Bladeless* ha experimentado sobre cómo conseguir la máxima eficiencia en la conversión de energía de turbinas eólicas; esta empresa presenta una clasificación considerando tamaño y generación de potencia. En la Tabla 1 se muestra esta clasificación.

Tabla 1. Clasificación de los ASA

Clasificación	Tamaño m	Peso Kg	Velocidad Nominal m/s	Potencia W
Nano	0.85	1.7	5	< 2
Tacoma	≈ 2.5	14	9	≈ 100
Atlantis	7-10	420	10.5	2 000
Goliat	≈ 140	270 000	12	1000 000

Esta segunda generación de equipos eólicos es considerada más amigable con el medio ambiente por su diseño, silencioso e inofensivo para las aves, las cuales a menudo sufren colisiones con las palas de los aerogeneradores convencionales (Sabab and Mohd, 2021). En la **Figura 2** se muestran los diferentes tamaños de acuerdo a la clasificación presentada en la Tabla 1.

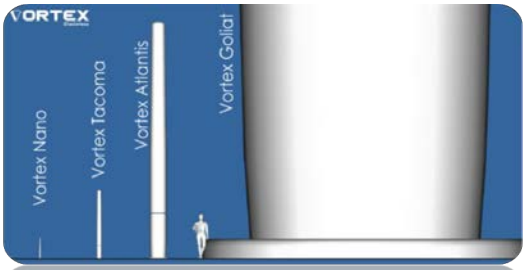


Figura 2. Tamaño de los ASA.

2.1 Funcionamiento del ASA

La tecnología *bladeless* consiste en un cilindro fijado verticalmente a una varilla elástica, en lugar de una torre, góndola y aspas, que son las partes cruciales de un aerogenerador convencional (Agnihotri et al., 2022). Esta nueva tecnología aprovecha un efecto denominado vorticidad que aprovecha las vibraciones inducidas por estos vórtices inducidos. Este efecto permite que las vibraciones del mástil entren en resonancia con el viento y se muevan de manera oscilatoria sobre su propio eje.

El fenómeno de resonancia aeroelástica aprovecha la energía del viento en la emisión de los vórtices de Von Karman, el cual trata de un fenómeno aeroelástico que se produce cuando en un fluido se interpone una estructura sólida, generando tras de sí una secuencia coordinada de vórtices. Los desprendimientos de vórtices son generados a través de las vibraciones que produce el viento al entrar en contacto con el ASA. De esta manera el dispositivo oscila con un movimiento silencioso y armónico. En la **Figura 3,** se puede observar la vorticidad originada.

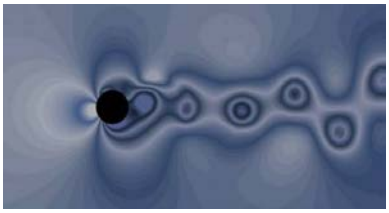


Figura 3. Contorno de presiones 2D del desprendimiento de vórtice**.**

La aparición de los vórtices depende de la velocidad del viento, y si la estructura tiene frecuencia natural similar, esta comenzará a oscilar absorbiendo energía por medio de los efectos de resonancia provocando que el cilindro oscile en un rango de velocidad de viento para posteriormente transformar la energía

ISSN: 2992-8338

mecánica en electricidad mediante un alternador integrado por una bobina y un imán.

2.1 Principales diferencias entre los ASA y los aerogeneradores convencionales.

Los aerogeneradores convencionales están conformados por un mecanismo mecánico el cual tiene muchos componentes que requieren de mantenimiento, son ruidosos, sus costos de mantenimiento son muy altos y es necesario contar con una dirección de viento específico, además, requieren de mayor espacio y son poco amigables con la fauna avícola.

En comparación con los ASA, son poco ruidosos, no requieren de mantenimiento, y no importa la orientación del aire, ya que por lo general la dirección del viento es variable, una estructura vertical y esbelta generalmente construida por la combinación de fibra de carbono y fibra de vidrio, los cuales son materiales comunes, relativamente económicos y de larga vida útil, es adecuada para recolectar energía eólica sin precisar de ejes mecánicos móviles, además, la distancia entre aerogeneradores es reducida permitiendo optimizar los terrenos donde pueden ser instalados

En la **Figura 4**, se muestran las principales diferencias entre la primera y segunda generación de equipos eólicos.

Figura 4. Principales diferencias de los ASA y los aerogeneradores convencionales.

3. CONCLUSIONES

La tecnología “bladeless” presenta un diseño innovador para la cosecha de energía eólica, este diseño cuenta con muchas ventajas ya que no utilizan rodamientos ni engranajes, reduciendo de esta manera el mantenimiento de esta máquina incrementándose su vida útil por encima de los aerogeneradores convencionales.

Este tipo de aerogenerador resonante de vibración inducida por vórtices busca captar la energía del viento aprovechando los efectos de estos vórtices inducidos. Estas oscilaciones se aprovechan para excitar un alternador el cual posee imanes y bobinas que generan electricidad sin necesitar partes rotativas a diferencia de un aerogenerador de primera generación.

Es importante mencionar que este tipo de aerogenerador no busca sustituir a los aerogeneradores convencionales, ni competir con ellos, esto debido a la diferencia que existe en la cantidad de producción de electricidad entre uno y otro, es mejor considerar que ambos son un complemento en la cosecha de energías limpias propiciando la generación distribuida con la integración de paneles solares.

Debido a su tamaño, la posibilidad de ser instalados en espacios pequeños, su reducido mantenimiento y la disminución del riesgo que representa el no tener aspas, este tipo de aerogeneradores de segunda generación pueden ser considerados como una eficiente alternativa para la captación de energía eléctrica a baja escala para su uso en residencias, espacios públicos e industrias.

AGRADECIMIENTOS

Jazmin Sarahi Jiménez Ramos agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de una beca de maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT: Cátedras CONAHCyT para jóvenes investigadores 2014 y SNI-CONAHCyT.

REFERENCIAS

Agnihotri, J.N., Bhamare, M.M., Amin, M.H., Patel, K.D., and Subhedar, D.G. (2022). Design enhancement and vibration analysis of bladeless wind turbine. In *Recent Advances in Manufacturing Modelling and Optimization: Select Proceedings of RAM 2021*, 775–786. Springer.

Aher, S., Chavan, P., Deshmukh, R., Pawar, V., and Thakre, M. (2021). Designing and software realization of an ann-based mppt-fed bladeless wind power generation. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 584–588.

Bhardwaj, V. and Teja, A.R. (2021). Mathematical modelling and equivalent circuit representation of bladeless wind turbines. In *IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1–6. IEEE.

Buela, A.C.R., Torres, R.R.M., Fermin, I., Meris, P.R.V., Manuel, M.C.E., Cruz, J.C.D., and Tud, R.C. (2021). Design and nonlinear static simulation of a small–scale vortex bladeless wind power generator. In *2021 IEEE International Conference on Automatic Control & Intelligent Systems (I2CACIS)*, 185–190. IEEE.

ISSN: 2992-8338

Francis, S., Umesh, V., and Shivakumar, S. (2021). Design and analysis of vortex bladeless wind turbine. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5584–5588.

Hameed, Z., Hong, Y., Cho, Y., Ahn, S., and Song, C. (2009). Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(1), 1–39.

Herbert, G.J., Iniyan, S., Sreevalsan, E., and Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 11(6), 1117–1145.

Herrero-Olarte, S. (2018). ¿ cómo son las comunidades marginales que generan pobreza estructural? *Papeles de población*, 24(98), 157–183.

Maftouni, N., Dehghan Manshadi, M., and Mousavi, S.M. (2021). The effect of drag force on the body frequencies and the power spectrum of a bladeless wind turbine. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 45(4), 604–611.

Mane, A., Kharade, M., Sonkambale, P., Tapase, S., and Kudte, S.S. (2017). Design & analysis of vortex blade- less turbine with gyro e-generator. In *7th International Conference On Recent Trends In Engineering, Science & Management*, 590–597.

Panwar, N.L., Kaushik, S.C., and Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1513–1524.

Prasad, A., Nagateja, P., and Subburaj, V. (2022). Solar coupled vortex bladeless wind turbine system with

Yazdi, E. A. (2018). Nonlinear model predictive control of a vortex-induced vibrations bladeless wind turbine. Smart Materials and Structures, 27(7), 075005.

ISSN: 2992-8338

Proposal for piezoelectric material for implementation in a wind turbine without blades.

K. A. Cruz Martínez*, M. E. Andrade Sanchez*, L. A. Jiménez Ponce*, J. A. Ramayo Pacheco*, A. Corona Arcila.*

[1]Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx. (Tel:5571837459 ; e-mail: 201911005@tese.edu.mx , mandrades@tese.edu.mx, lajimenezp@tese.edu.mx, 201910097@tese.edu.mx, coaa201920076@tese.edu.mx).

Abstract: For this work, a comparison was made of the different types of commercial piezoelectric materials and a PVDF/$BaTiO_3$ polymer composite as a manufacturing proposal, looking for the most suitable one for electrical energy generation, withstanding the main vibration and flexibility forces generated by a bladeless nano wind turbine. be in contact with the wind. The selection of the piezoelectric material was carried out taking into account the mechanical behavior of the wind turbine and the energy generation efficiency of each material analyzed, this from the first proposal of the model for a bladeless wind turbine designed in CAD, from the CATIA program. , which was previously analyzed in the Ansys Student software, mainly to know the behavior of the model within a Von Karman eddy street and this same model was built in 3D printing to carry out wind tunnel tests later.

Keywords: piezoelectric, polymer, nano wind turbine, energy, model, vibration, Ansys. .

1. INTRODUCCIÓN

Debido a los diversos problemas climáticos que sufre el planeta hoy en día, principalmente por el uso excesivo de combustibles fósiles para la generación de electricidad, las energías renovables tienen un papel importante en la sociedad. En México la capacidad instalada de generación de energía se divide en recursos renovables y fósiles, como se observa en la **Tabla 1**. (Alonso & García Beltrán, 2020).

Lo que nos deja ver la poca implementación de las energías renovables que existen en México, ya que del 100% del total de energía, solo el 32% es generada a través de fuentes alternas al combustible fósil. La energía eólica es la segunda en generar más electricidad, por lo que durante las últimas décadas ha tenido una gran evolución respecto a los dispositivos que producen tal ayuda al medio ambiente. (Alonso & García Beltrán, 2020)

Tabla 1 Generación de energía en México -

CATEGORÍA	FUENTE	PORCENTAJE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN MÉXICO
ENERGIAS RENOVABLES	Hidroeléctrica	15.2 %
	Eólica	7.8%
	Fotovoltaica	6.2%
	Bioenergía	0.5%
	Nuclear	1.9%
	Geotérmica	1.1%
FÓSILES	Hidrocarburos convencionales (gas, petróleo, carbón y termoeléctrica)	67.3%
TOTAL		100%

Actualmente los aerogeneradores ordinarios de eje horizontal y vertical no ofrecen un buen rendimiento con respecto a lo que se requiere para abastecer una cantidad favorable de energía, lo cual a propiciado la creación de nuevos modelos, tal como el aerogenerador sin palas, estos dispositivos brindan ventajas, como generar más energía a mayor velocidad del viento, no generar ruido, sin riesgos de accidentes en aves ni en la comunidad, además de barato en materiales, montaje y mantenimiento.

El aerogenerador sin palas aprovecha la energía eólica por medio del fenómeno de aparición de vórtices, llamado vortex shedding (**Figura 1)**. El cilindro oscila en un rango de velocidad de viento, que posteriormente transforma la energía mecánica en electricidad mediante un alternador (Morimitsu, 2015).

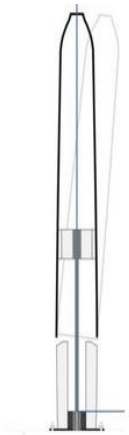


Figura 1 Aerogeneradores sin palas "Vortex Bladeless"-

ISSN: 2992-8338

Por otro lado, este aerogenerador tiene como principal característica el uso de materiales piezoeléctricos, estos son cristales tipo perovskita que tienen pequeños iones metálicos tetravalentes ubicados dentro de una red de otros iones divalentes más grandes y carecen de centro simétrico, estos funcionan al generar dipolos cuando se someten a esfuerzos mecánicos como tensión o compresión, ya que la estructura se altera, ocurre un desplazamiento del ion central y cambia la dirección de la polarización como se muestra en la **Figura. 2**, (Ledoux, 2011) de esa manera se generan un voltaje.

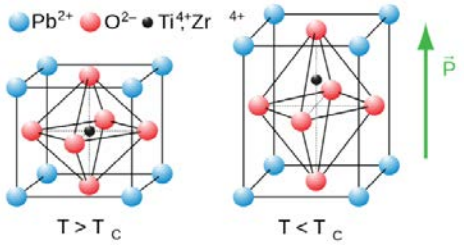


Figura 2 Desplazamiento del ion central de la estructura cristalina a) sin dipolo b) con dipolo -

El piezoeléctrico se comporta como un generador cuando la tracción mecánica a lo largo de la dirección de polarización, o la compresión perpendicular a la dirección de polarización, genera tensión eléctrica con polaridad opuesta a la de la tracción mecánica de polarización. A continuación, se muestra gráficamente en la **Figura. 3**, el efecto piezoeléctrico directo, a partir de someter una placa a una presión paralela al espesor, se tiene una fuerza F de compresión y utiliza la polarización P en paralelo al espesor, siendo proporcional a la tensión T aplicada, posteriormente la carga de polarización piezoeléctrica en los electrodos que cubren las caras es proporcional a la fuerza que causa la tensión. (Jan Tichy, 2010)

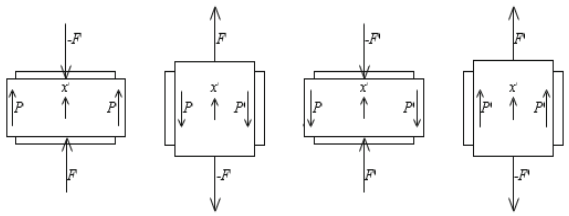


Figura 3 Efecto piezoeléctrico directo – fundamentos de la sensorización piezoeléctrica.

En este efecto directo el dipolo eléctrico medio (P) creado por la tensión extensiva (T) paralela a su eje de polarización se define con las siguientes ecuaciones:

$$P = d\,T \qquad (1)$$

Donde P es el componente del vector de polarización, d es el coeficiente piezoeléctrico y T es el componente del tensor de tensión. (Melero, 2010)

Para función del campo y el desplazamiento eléctricos se describe como:

$$P = D - \varepsilon^T E \qquad (2)$$

Donde ε es la permitividad y E el campo eléctrico.

Al relacionar ambas expresiones para determinar la energía se obtiene lo siguiente:

$$D = dT + \varepsilon^T E \qquad (3)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\varepsilon^T} \qquad (4)$$

Donde g es la constante de carga piezoeléctrica. (Melero, 2010)

Dentro de los piezoeléctricos es de suma importancia la estructura perovskita del $BaTiO_3$ ya que tiene un bajo grado de distorsión, por lo que se puede considerar una red estable. En el titanato de bario se forman dos enlaces distintos entre los átomos de sus elementos. Las cargas positivas de los átomos acomodados en las esquinas de la red pertenecientes al catión Ba^{+2}, son atraías por las cargas negativas de los átomos distribuidos en las caras de la red, pertenecientes al anión O^{-2}, formando así un enlace. De la misma manera, se forma otro enlace entre el anión O^{-2} y el catión Ti^{+4} que se encuentra en el centro de la red (Ocotero, 2015). Los enlaces Ba-O y Ti-O son representados en la **Figura 4.**

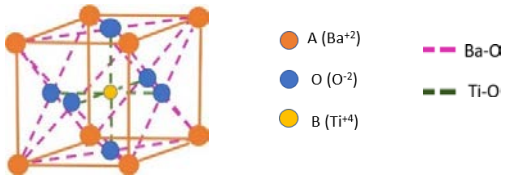


Figura 4 Enlaces Ba-O (líneas color rosa) y Ti-O (líneas color verde) en la red del $BaTiO_3$.

Por otra parte, ya conociendo la estructura de $BaTiO_3$, hay diversos métodos para sintetizarlo, pero uno de los más sencillos es el método sol-gel en pH ácido, que es un método químico para la síntesis de materiales convencionales y nanométricos, que se define como una ruta coloidal utilizada para sintetizar cerámicos con una fase intermedia, incluyendo un estado solo gel (Pierre, 1998) .

La síntesis por sol-gel involucra dos reacciones; la primera es la hidrólisis de los precursores metálicos, también conocida como etapa sol; y la segunda es la policondensación de los precursores hidrolizados, llamada etapa gel. A partir de las condiciones de cada una se puede sintetizar diferentes productos (Balla, et al., 2000). La reacción sol- gel se inicia con la hidrólisis y condensación de alcóxidos metálicos (Carturan, 1988).

ISSN: 2992-8338

La reacción de hidrólisis se lleva a cabo por la adición de un solvente al alcóxido metálico bajo condiciones ácidas, básicas o neutras. De acuerdo con el mecanismo de reacción se pueden presentar tres tipos de ligandos (Carturan, 1988), donde

M= metal, O= oxígeno y H= hidrógeno:

M - (OH) complejo acuo

M = O: complejo oxo

M - OH: complejo hidroxo

De acuerdo con los precursores que se utilizarán para la síntesis de $BaTiO_3$, se va a llevar a cabo el mecanismo de hidrólisis en medio ácido y en medio acuoso neutro.

La reacción de hidrólisis en medio ácido utilizando titanato de tetrabutilo Ti $(OC^4H^9)^4$ como metal alcóxido M(OR)n, y metanol CH^3OH acuoso como solvente sucede de la siguiente manera: primeramente, sucede una reacción secundaria, en donde un ácido H^+ proveniente del metanol se enlaza a uno de los ligandos (OC^4H^9) del metal (se conocen como ligandos a las moléculas o los iones que se enlazan al ion metálico) (Balla, et al., 2000)

A todo lo ya mencionado, se encontró una amplia variedad de aplicaciones para estos materiales en diferentes campos, iniciando por los transductores ultrasónicos, que sirven para inspección no destructiva de materiales y detectar defectos, también los actuadores, estos convierten señales eléctricas en un desplazamiento físico, así se ejecutaron en acelerómetros, que miden la fuerza de velocidad a través de señales, aunque la aplicación más importante en este trabajo es la de sensores , que sirve para transformar una entrada física como vibración o deformación a una señal eléctrica y de ahí los generadores que convierten energía mecánica en eléctrica. (Molina, 2018) En base a esta aplicación se implementa en el aerogenerador para una mayor recolección de energía renovable, en este caso con aerogeneradores sin palas y así aumentar la producción de electricidad por medio de energía eólica. (Ledoux, 2011)

El propósito de este trabajo es realizar la caracterización de materiales piezoeléctricos comerciales y proponer el desarrollo de un compuesto polímero piezoeléctrico basado en partículas de titanato de bario ($BaTiO_3$) encapsuladas en una matriz polimérica de fluoruro de polivinilideno (PVDF)

Objetivos particulares

Comparar piezoeléctricos comerciales en base a sus características

Sintetizar la fase tetragonal del $BaTiO_3$ mediante el método de sol-gel

Sintetizar la fase b del PVDF mediante el método de fundición-solvente y un subsecuente tratamiento térmico.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo de este trabajo se lleva a cabo mediante la siguiente metodología con las etapas propuestas, como se muestra en la **Figura 5**

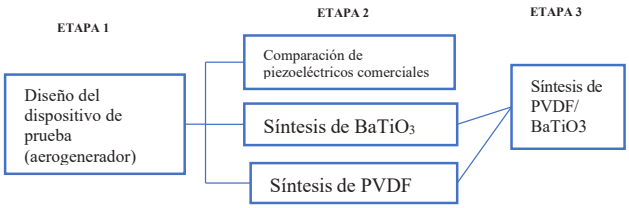


Figura 5 Metodología experimental

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para dar inicio con el desarrollo del proyecto se necesita de un previo desarrollo del aerogenerador sin palas, así para tener un modelo en el cual se pueda implementar dicho material piezoeléctrico, se propuso un nano aerogenerador de 1m x 15cm sin palas, que genere aproximadamente 2KW/h, ya que estos se adaptan de manera correcta a las condiciones locales. La selección del material dependerá del comportamiento dentro del aerogenerador, esto para conocer la cantidad y localización de dichos materiales alrededor del dispositivo.
Con estas especificaciones, se diseñó la primera propuesta del modelo en CATIA, **Figura.6** escalado a 1:6 con las medidas planeadas para las prácticas que se requieren hacer más adelante, partiendo del diseño ya existente, solo modificando ciertas partes de la estructura a favor de la colocación de los materiales piezoeléctricos, en este caso una conicidad a la mitad del cilindro lo que causa un cambio de diámetro, buscando una zona mecánicamente activa y que exista una compresión en la red de piezoeléctricos en esa superficie, logrando activar el efecto y cumpla su función.

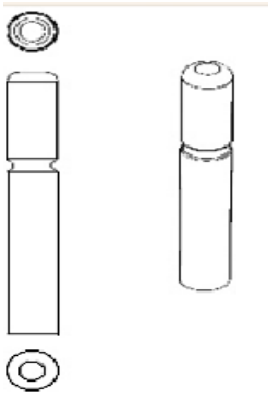


Figura 6 Plano de diseño en CATIA del primer modelo

Figura 11 Primer modelo impreso en 3D

ISSN: 2992-8338

Posteriormente, este prototipo se llevó a un análisis de dinámica de fluidos computacional (DCF) en Ansys Student, de tipo transitorio, donde los resultados ayudan a predecir y analizar el comportamiento de los fluidos dentro del aerogenerador de forma casi exacta, mostrando un fenómeno aerodinámico llamado vórtices de Von Kármán que ocurren cuando el fluido se encuentra con un obstáculo y detrás de dicho obstáculo se forma una estela de remolinos que se alternan. Los resultados de interés son los vórtices totales, en este caso se obtuvieron 55 y el tamaño de la estela, que fue de 0.323m de dichas oscilaciones causadas, lo cual nos deja confirmar un buen funcionamiento en este modelo de aerogenerador. Se puede observar la simulación del desarrollo de vórtices al momento del impacto del viento con la superficie en la **Figura. 7.**

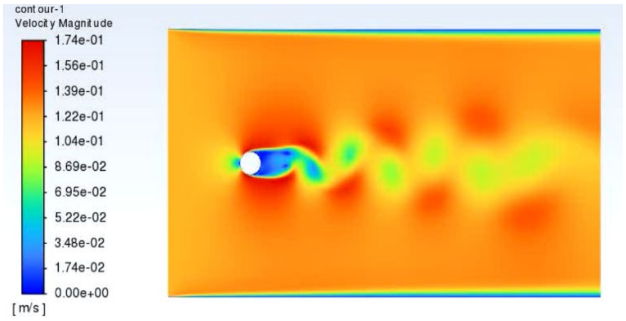


Figura 7 Análisis CFD del aerogenerador sin palas en ANSYS

Algunos temas de interés al observar el análisis son las vibraciones inducidas por vórtices, el número de Strouhal y el número de Courant.

Las vibraciones inducidas por vórtices se generan al formarse desprendimiento irregular de vórtices en el flujo detrás del cuerpo. Este desprendimiento irregular de vórtices generará una diferencia de presiones fluctuante, que a su vez produce una fuerza de levantamiento. Dado este fenómeno, se produce un movimiento oscilante.

Cuando en un flujo existe un movimiento periódico, el número de Strouhal toma relevancia, ya que este número está relacionado con las oscilaciones que existen en el flujo y el número de Courant es crucial para los análisis de tipo transitorio Dado que el tiempo es esencial en este tipo de análisis y se utiliza para determinar la estabilidad y precisión de las simulaciones transitorias.

Para dicho análisis los parámetros utilizados de más relevancia fueron los siguientes: el tipo de malla, que es estructurada con elemento tetragonal lineal de 8 nodos, el tamaño del elemento de la malla y del elemento para la función “inflation” se muestran a continuación en la **Figura 8**, así como las condiciones de frontera, en la **Figura 9**

Como modelo de turbulencia se eligió Shear Stress Transport (SST) k-ω realizable.

En último paso es fundamental que se determine el número y tamaño de pasos de tiempo, ya que estos determinan la duración del análisis. Se muestra la configuración que se consideró para esta sección en la **Figura 10**

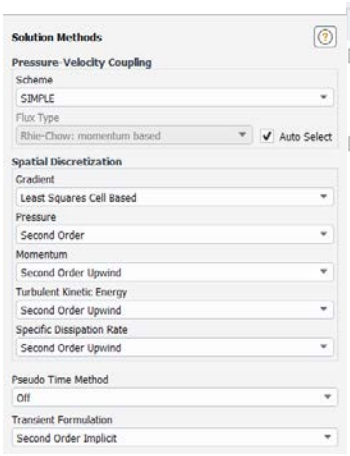


Figura 8 Configuración para mallado en Ansys

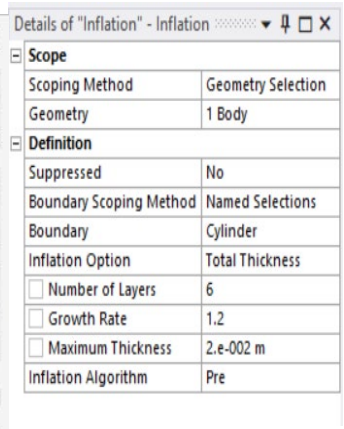


Figura 9 Condiciones de frontera para análisis transitorio

Los resultados que arroja la dinámica de fluidos computacional serán comparados con los análisis de túnel de viento, esperando una relación entre ambos tipos de análisis, ya que como se mencionó anteriormente, este análisis no arroja resultados de forma exacta. Para continuar con la experimentación física en el túnel de viento, se construyó dicho prototipo a escala en impresión 3D como se observa en la **Figura 11.**

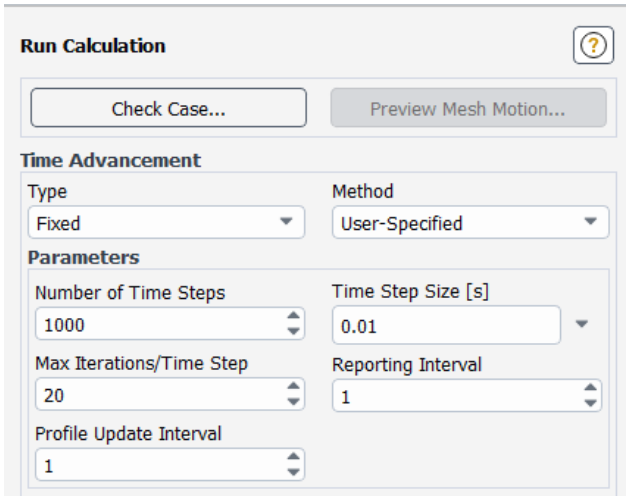


Figura 10 Parámetros de pasos y tamaño de tiempo para análisis

ISSN: 2992-8338

4. COMPARACIÓN DE MATERIALES PIEZOELECTRICOS

A continuación, se muestra el análisis en la tabla, **Tabla 2,** donde se describen las características que brindan los 3 tipos más comunes de materiales piezoeléctricos comerciales: cristales, cerámicos y polímeros, se muestran ventajas, desventajas y especificaciones. Con relación al objetivo de este proyecto se presenta como una de las mejores opciones los polímeros PVDF debido a sus excelentes propiedades como la flexibilidad, sensibilidad y rigidez justamente las características que se buscan. (Cabello, s.f.) Además el PVDF ha demostrado su buen comportamiento como dieléctrico gracias a su alta permitividad y su bajo factor de disipación.

Tabla 2 TABLA DE COMPARACIÓN PARA MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

MATERIAL PIEZOELÉCTRICO	*CARACTERISTICAS*
Cristales piezoeléctricos	• Alta estabilidad a lo largo del tiempo, amplio rango de temperaturas • Buena resistencia química. • Baja flexibilidad en comparación con otros tipos de materiales.
Cerámicas PTZ	• Amplio rango de aplicaciones. • Buena resistencia mecánica. • Sensibles a la temperatura y la humedad. • Algunas cerámicas PZT son tóxicas debido al plomo, lo que puede limitar su uso.
Polímeros PVDF	• Ligeros, flexibles, sensibles a bajas fuerzas • Resistencia al calor y la combustión • Alta rigidez y resistencia a la deformación • Aislante eléctrico • No toxico

5. SINTESIS DE BaTiO3/ PVDF

Posteriormente se realizó la **síntesis de $BaTiO_3$** donde se propone el proceso de sol-gel. como precursor del bario, el cual se utilizará acetato de bario $Ba(CH_3COO)_2$, este es un éster. Como precursores del titanio, se consideran dos propuestas de alcóxidos, titanato de tetrabutilo $Ti(OC_4H_9)_4$ e isopropóxido de titanio $Ti(OC_3H_7)_4$.
El solvente propuesto es metanol CH_3OH, el cual al ser ácido, define que la ruta de síntesis por sol-gel que se llevará a cabo será la de hidrólisis en medio ácido. Además, se propone explorar el etanol como otra propuesta de solvente. De acuerdo con la literatura (Wan & Bowen, 2009)se ha realizado síntesis de $BaTiO_3$ por método sol-gel bajo distintas condiciones. En la **Tabla 3** se muestra una comparación de las distintas síntesis y las propiedades dieléctricas de los productos obtenidos respectivamente. Los experimentos resaltados en azul son los que, por sus resultados, son de mayor relevancia para los fines de esta investigación

Síntesis de PVDF

Por consiguiente, se propone la síntesis de PVDF por el método de fundición-solvente utilizando 2.3826 ml de DMSO como solvente Y 0.3791 g de monómero de FV que corresponden a una concentración del 15% en peso de PVDF en el solvente.
Para lograr la fase deseada β, se propone el proceso de transformación de fase, el cual se llevará a cabo de la fase g a la β mediante un tratamiento térmico.

Síntesis de PVDF/$BaTiO_3$

Una vez sintetizados individualmente ambos materiales, se procede a realizar la síntesis de PVDF/ $BaTiO_3$, en donde las partículas de $BaTiO_3$ se van a encapsular con la matriz polimérica para formar el compuesto polimérico piezoeléctrico, esto a través de un mezclado mecánico.
Se prepara el polímero en la etapa de iniciación del proceso de polimerización por adición y ahí se incluyen las partículas de $BaTiO_3$. Se realiza un mezclado controlando las variables de tiempo y temperatura, para posteriormente permitir inicie la etapa de término del proceso de polimerización.
Posteriormente, se procederá a la fabricación de películas de PVDF/ $BaTiO_3$ con diferentes concentraciones de $BaTiO_3$, por medio de spin coating. Seguido del depósito de las películas,

.

6. TRABAJOS FUTUROS

La continuación de este trabajo consiste en el término de la síntesis del compuesto para la fabricación y la experimentación física del material piezoeléctrico que se elija, ya sea comercial o el compuesto desarrollado, esto con la finalidad de conocer la energía que brinda cada uno y determinar la cantidad que compondrá la red de estos, Conociendo estos parámetros, se diseñará una red para cosecha de energía que se colocará dependiendo de configuración que se determine para el dispositivo, es decir, la localización o punto estratégico dentro de la estructura donde se generé mayor esfuerzo de compresión que pueda activar el piezoeléctrico. Posteriormente se realizará un circuito eléctrico que permita almacenar la energía y la distribuya como corresponda.

7. CONCLUSIONES

En el transcurso de este estudio, se llevó a cabo una comparación entre varios materiales piezoeléctricos, así como el desarrollo de la síntesis de PVDF/ $BaTiO_3$ para la fabricación y tras analizar el fenómeno vibracional ocurrido en el modelo estudiado y las características, propiedades junto a capacidades de los piezoeléctricos comerciales disponibles se busca la propuesta con mejor eficiencia.
Así mismo, se identificó que se tiene que estudiar la capacidad de respuesta del material piezoeléctrico usado, específicamente dentro del análisis del modelo en túnel de viento, para determinar con mayor certeza la cantidad de energía generada y proyectar una magnitud promedio de esta.

ISSN: 2992-8338

Tabla 3 TABLA DE COMPARATIVA DE DISTINTOS EXPERIMENTOS DE SOL-GEL PARA OBTENCIÓN DE $BATIO_3$

Síntesis	Propiedades dieléctricas del producto	Observaciones
$Ba(CH_3COO)_2 + Ti(OC_4H_9)_4 \xrightarrow{1300°C} BaTiO_3$ [7]	Los polvos obtenidos tienen las siguientes propiedades: Pérdida dieléctrica **ξ**= 0.021 a 500kHz Campo coercitivo **E_c**= 35kV/cm Temperatura de Curie **T_c**= 119°C Constante dieléctrica **K**≈1000 Tamaño de grano= 20 µm	Se obtuvo la fase tetragonal a 1300°C y a esa temperatura se midieron las propiedades
$Ba(C_7H_{15}COO)_2 + Ti(OC_3H_7)_4 \xrightarrow{750°C} BaTiO_3$ [24]	Las películas obtenidas tienen las siguientes propiedades: Polarización remanente **P_r**:8 µC/cm² Pérdida dieléctrica **ξ** = 12 a 1kHz Campo coercitivo **E_c**= 35kV/cm Temperatura de Curie **T_c**= 117°C Constante dieléctrica **K**=521 **Ruptura eléctrica**= 200 Kv/cm Grosor de la película= 0.3 µm	La máxima temperatura a la que se llegó fueron 750°C. Se utilizó un substrato de platino.
$Ba(CH_3COO)_2$+ $Ti(OC_4H_9)_4 \rightarrow BaTiO_3$ [25]	Los polvos nanoporosos obtenidos no presentaron propiedades dieléctricas	Los precursores fueron comprados. Se midieron características electro reológicas de fluidos que contenían las partículas nanoporosas
$Ba(CH_3COO)_2$+ $Ti(OC_3H_7)_4$+ $Ce(C_5H_7O_2)_3$ $\xrightarrow{1100°C}$]	Los polvos obtenidos tienen las siguientes propiedades: Pérdida dieléctrica **ξ** = 0.018 Temperatura de Curie **T_c**= 22°C Constante dieléctrica **K**≈10130 a 100 Hz Tamaño de grano= 400 nm	Se dopó el $BaTiO_3$ con Cerio a 5.5% molar, lo que causa decremento significativo en la temperatura de Curie. Se obtuvo la fase tetragonal a 1100°C.
$Ba(CH_3COO)_2$+ $Ti(OC_3H_7)_4$ $\xrightarrow{900°C}$ $BaTiO_3$ [27]	Los polvos obtenidos tienen las siguientes propiedades: Tamaño de grano= 120 µm	Se dopó el $BaTiO_3$ con cationes de Na, Ca y Bi. Se obtuvo la fase tetragonal a 900°C.
$Ba(CH_3COO)_2$+ $Ti(OC_3H_7)_4$ $\xrightarrow{700°C}$ $BaTiO_3$ [28]	No se reportaron propiedades dieléctricas de los polvos obtenidos	La cristalización ocurrió a 520°C. A 700° reportaron fase tetragonal o cúbica
$BaO + Ti(OC_3H_7)_4 \rightarrow BaTiO_3$ [29]	No se reportaron propiedades dieléctricas de los polvos obtenidos	Se obtuvieron polvos de $BaTiO_3$ (cúbico), Ba_2TiO_4, $BaTi_2O_5$ y $BaTi_4O_9$ y se compararon sus densidades

8. Bibliografía

1.- Aleida Azamar Alonso, Y. M. G. B., 2020. *Diagnosis and risks of the wind energy in Mexico*. p. 32.
2.-Balla, A. S., Guo, R. & Roy , R., 2000. *The perovskite structure—a review of its role in ceramic science and technology.* s.l.:s.n.
3.-Cabello, R. V., s.f. *Caracterización de la respuesta piezoelectrica de compuestos basados en PVDF-BaTio.* [En línea].
4.-Carturan, M. G. a. G., 1988. *Precursors for sol-gel preparations.* s.l.:s.n.
5.-Jan Tichy, E. K., 2010. *Fundamentals of piezoelectric.* s.l.:s.n.
6.-Ledoux, A., 2011. *Teoria de los materiales piezoelectricos y sus aplicaciones en ingeniería civil- Tesis.* [En línea].
7.-Melero, F. G., 2010. *Principios de piezoelectricidad,* s.l.: s.n.
8.-Molina, G., 2018. *Diseño de un sistema de energy haversig basado en piezoelectricos,* s.l.: s.n.
9.-Morimitsu, D. T., 2015. *Diseño de un generador eolica de eje vertial de baja potencia,* s.l.: s.n.
10.-Ocotero, V. M., 2015. *Lecturas de apoyo para comprender mejor la química.* s.l.:s.n.
11.-Pierre, A. C., 1998. *Introduction to sol-gel processing.* s.l.:s.n.
Wan , C. & Bowen, C. R., 2009. *Structure and electrical properties of batio3 prepared by sol–gel process.* s.l.:s.n.

ISSN: 2992-8338

Design and geometry analysis for bladeless wind electric generator inside von karman street.

J.A. Ramayo Pacheco*, M.E. Andrade Sánchez*, L.A. Jiménez Ponce*, K.A. Cruz Martínez*, A. Corona Arcila*

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Méx. (Tel: 52+ 55 5000 2300; e-mail: 201910097@tese.edu.mx, mandrades@tese.edu.mx, lajimenezp@tese.edu.mx, 201911005@tese.edu.mx, COAA201920076@tese.edu.mx)

Abstract: In this research project, the primary objective is to develop a wind turbine model capable of harnessing energy through vibrational mechanisms, while concurrently identifying regions exhibiting the highest tensile and compressive stress levels. To achieve this objective, a structured methodology was employed, encompassing the exploration of diverse geometric configurations for the wind turbine design. These geometries were subjected to rigorous Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis to empirically substantiate the presence of Von Karman vortices. This study presents the mathematical expressions associated with the Courant number, Strouhal number, and reduced frequency, all of which were integral to the analytical processes conducted via ANSYS Fluent. Moreover, this work provides a comprehensive exposition of the findings derived from the evaluation of each variant of the wind turbine under scrutiny.

Keyword: *Von Karman Street vortex, Courant number, Strouhal number, reduced frequency, Computational Fluid Dynamics (CFD).*

1. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad, además, de su uso en general para procesos industriales y de transporte ha aumentado la contaminación por gases de efecto invernadero afectando el clima (Castañeda et al., 2017). Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda a nivel mundial ocasionando dos terceras partes de emisiones globales de CO_2, siendo México el 14vo país en generación de. En la siguiente tabla se muestra los datos semestrales del consumo de combustibles para la generación de energía según los datos de la secretaria de energía (SENER) del año 2022.

Tabla 1 Consumo de combustibles semestral del año 2022 (Sistema de Información energética (2022))

	I/2022	II/2022
Consumo de Combustóleo (l)	1944002756.00	1877871100.00
Consumo de Diesel (l)	437743934.85	639119643.10
Consumo de Carbón (kg)	2113815270.00	1977125780.00
Consumo de Gas Natural (m3)	49867729603.93	65889659823.04

El uso de los combustibles fósiles plantea un desafío significativo por su naturaleza no renovable. Por lo tanto, se ha impulsado la búsqueda de alternativas que permitan incrementar la generación de energía mediante fuentes limpias y renovables. Entre las alternativas mas destacadas se encuentra la energía solar, eólica hidroeléctrica, biomasa y biocarburantes (SENER) de 2020.

Estas fuentes ofrecen una solución sostenible que contribuye a reducir la huella de carbono y mitigar los efectos del cambio climático. En el siguiente gráfico, se presentan los datos proporcionados por la Secretaría de Energía (SENER) que muestra la producción anual de electricidad, tanto proveniente de combustibles fósiles como de fuentes renovables.

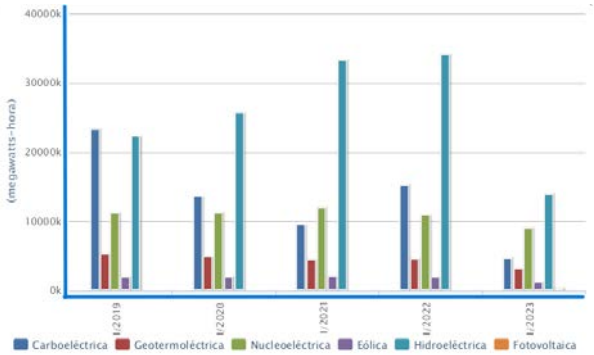


Figura 1. Comparación de producción de energía con diferentes tecnologías. (Sistema de Información energética (2022))

ISSN: 2992-8338

Una de las energías renovables que muestra potencial en México es la energía producida por el viento, para ello, se han construido turbinas eólicas capaces de transformar la energía cinética en energía eléctrica, capaces de suministrar energía a hogares, pero para ello se necesitan grandes espacios para poder generar alrededor de 1MW de potencia. A causa de esto, se ha dañado a la fauna, desplazando a los animales de su habitad y con la muerte de aves a causa de las palas de los aerogeneradores convencionales instalados. (Perez et al., 2023)

El objetivo de esta investigación es proponer una geometría de aerogenerador sin palas y también encontrar las zonas donde se generen mayores esfuerzos e implementar una red de piezoeléctricos mediante análisis CFD.

2. METODOLOGÍA.

La metodología que se usó para el diseño del aerogenerador sin palas se muestra en el siguiente diagrama.

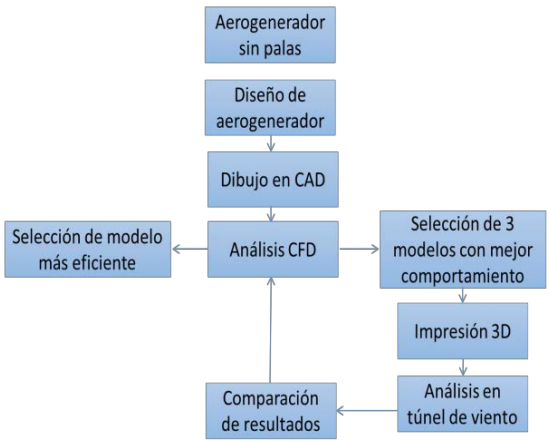
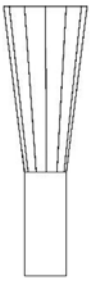
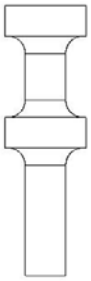


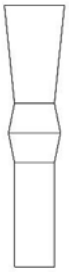
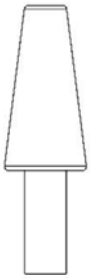
Figura 2 Metodología de diseño de aerogenerador sin palas

Se tomo en cuenta las especificaciones de un nano aerogenerador para modelar las propuestas en CATIA V5, por ende, los parámetros de diseño considerados fueron, 1.3m de altura y un radio de 20-30 cm. Es decir, el diámetro del mástil va en incremento de altura de la base sin contar donde va sujeto al suelo. Se realizaron 10 modelos con diferentes diámetros, ya que la geometría que se implementa es la de un cilindro. En la siguiente tabla se muestran los 10 modelos.

Tabla 2 Diseños de aerogeneradores propuestos

Modelo	Ilustración del modelo	Características.
1		Volumen cilíndrico, con extremo superior semi esférico.
2		Volumen cilíndrico con extremo superior conico.
3		Volumen cilíndrico con extremo superior en forma de espiral.
4		Volumen cilíndrico con diferencia de radio en la parte superior con redondeos.
5		Volumen cilíndrico con diferencia de diametro en parte media y superior.

ISSN: 2992-8338

6		Volumen cilíndrico con extremo superior cónico y diferencia de radio en zona central
7		Volumen cilíndrico con diferencia de diamtero con chaflanes.
8		Volumen cilíndrico cónico con redondeos en parte superior e inferior.
9		Volumen cilíndrico cónico con redondeos en la parte inferior y semi esferico en la parte superior.
10		Volumen cilíndrico con ectremo superior cónica.

Para los análisis en CFD de cada modelo se hizo una breve investigación del comportamiento de la dinámica de fluidos computacional, para ello se estudió el fenómeno aerodinámico de las vibraciones inducidas por vórtices (VIV). Este fenómeno también es conocido por Calle de Remolinos de Von Karman, el cual consiste en la interacción de un fluido con un objeto, ocurriendo un desprendimiento de la capa limite por la diferencia de presiones.

Para poder trabajar con la dinámica de fluidos computacional fue necesario considerar las variaciones en los parámetros del número de Strouhal, número de Courant y la frecuencia reducida.

2.1.-NÚMERO DE STROUHAL.

Al decir que un flujo es periódico se toma en cuenta el número de Strouhal, ya que está relacionado con las oscilaciones que existen en un flujo. Este número es adimensional y está dado por la siguiente ecuación. (Lassig et al., 2019)

$$S_{tr} = \frac{fD}{U} \quad (1)$$

Donde f es la frecuencia de desprendimiento de vórtices, D es el diámetro del cilindro, y U es la velocidad de flujo libre. (Graciano y D.M.G, 2021)

2.2.- NUMERO DE COURANT

Los análisis que se llevan a cabo son de tipo transitorio, para esto es crucial el número de Courant ya que estudia el comportamiento de un fluido en un punto fijo en el tiempo. El tiempo en estos análisis es esencial para determinar la estabilidad y precisión de las simulaciones transitorias. El número de courant garantiza el paso de tiempo elegido sea los suficientemente pequeño para captar los cambios del flujo a lo largo del tiempo. La determinación de este parámetro se expresa en la siguiente ecuación:

$$Co = \frac{v\Delta t}{\Delta x} \quad (2)$$

Donde v es la velocidad del fluido, Δt es el paso de tiempo, Δx es el tamaño medio de la celda.(Tahir, Mabrouk y Koc, 2019)

2.3.-FRECUENCIA REDUCIDA

Esta frecuencia es una medida adimensional que compara y analiza el comportamiento de los flujos oscilatorios por la relación de las características del flujo y la geometría. Se puede calcular a través de la siguiente expresión.

ISSN: 2992-8338

$$K = \frac{fD}{V} \quad (3)$$

Donde f es la frecuencia de oscilación, D es el diámetro del cilindro, y V es la velocidad del fluido. (Sevillano, 2020)

Al conocer los temas y las consideraciones que se deben tomar en cuenta, pasamos a los análisis CFD en Ansys fluent.

2.4.- ANÁLISIS CFD

Comenzamos importando el modelo a Ansys para poder crear un volumen de control en el que va a interactuar el fluido.

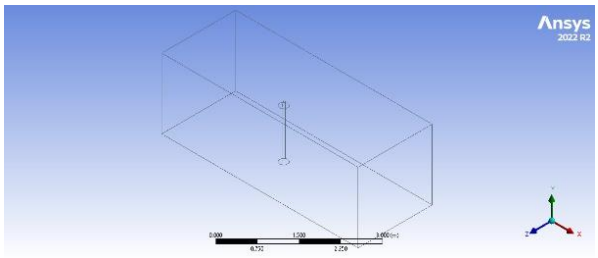


Figura 3 Volumen de control

Las medidas del volumen de control se tomaron con respecto al túnel de viento, aumentando la escuela de la caja de 6:1. A continuación, se muestran en las siguientes imágenes las medidas del volumen de control.

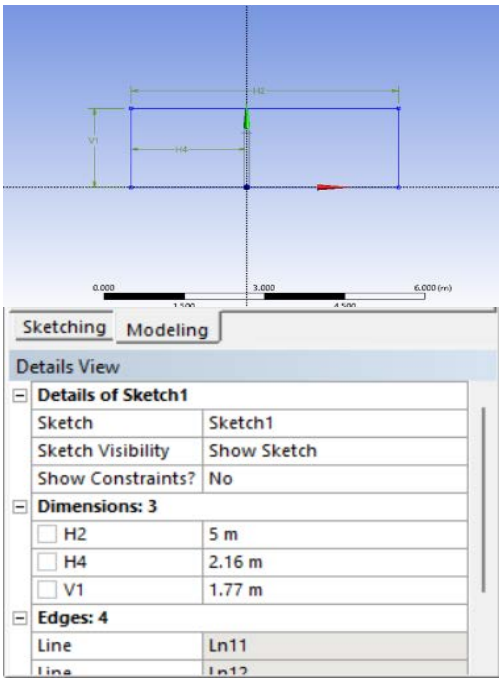


Figura 4 Medidas del volumen de control

3. Resultados

Para determinar los modelos con mejor comportamiento se realizó una comparación de los resultados por medio de una medición directa de los análisis para obtener el tamaño de la estela y el número de oscilaciones que llega a provocar cada modelo.

El análisis se observa en la siguiente imagen en 2D, en la cual se creó una estela formada por el fluido a una velocidad de 5m/s.

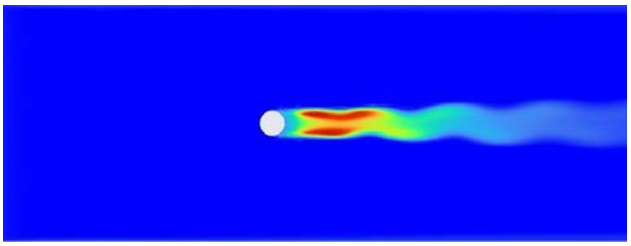


Figura 5 Efecto Von Karman en plano 2D del modelo 1

Como se mencionó anteriormente, se hizo un conteo y una medición directa de la estela en las imágenes arrogadas por el análisis. En la siguiente tabla se puede ver los datos obtenidos al hacer este análisis.

Tabla 3 Resultados de los modelos en ANSYS.

Modelo	Velocidad (m/s)	Vórtices totales	Tamaño de la estela (m)
1	5	53	0.31
2		37	0.68
3		39	0.834
4		55	0.323
5		30	0.865
6		40	0.618
7		53	0.34
8		32	0.9
9		36	0.741
10		33	0.851

4. CONCLUSIONES

Para finalizar este trabajo, se puede entender que la geometría en forma transversal no genera un cambio significativo en la generación de los remolinos, por otra parte, mientras más grande el diámetro más rápido se desprende la capa límite del aerogenerador. Las geometrías más complejas generan más números de vórtices, pero menos oscilación por la rigidez.

ISSN: 2992-8338

5. REFERENCIAS

Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C. C., & Segura-Madrigal, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 18(1), 103-112.

Catalán Alonso, H. (2021). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. Problemas del desarrollo, 52(204), 59-83.

Secretaria de Energía de México. (2020) Infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional (México). Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional. https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/SubsecretariaElectricidad/ConjuntosProyectosInversion/SENER_07_ProgramaDesarrolloSistemaElctricoNacional20202034(PRODESEN).pdf

Sistema de Información energética (2022) https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temasPérez Gosteva, T., Mondragon Ruiz, I., Martínez Durango, V., & García Niño, C. (2023). Energía eólica y aerogeneradores de eje vertical y horizontal. UGCiencia, 28(1). https://doi.org/10.18634/ugcj.28v.1i.1283

GRACIANO, D. M. G. (2021). Determinación del efecto de la estela de vórtices en la oscilación de un conjunto de generadores eólicos por vorticidad.

Tahir, F., Mabrouk, A. y Koc, M. (2019). Revisión del análisis CFD de evaporadores de película descendente horizontales en plantas desaladoras multiefecto. Desalinización. Tratamiento de agua, 166, 296-320.

Franco Sevillano, E. (2020). Evaluación del fenómeno desprendimiento de torbellinos bajo condiciones de resonancia en puentes colgantes peatonales.

Lassig, J., Lastra, M., & Sosa, J. V (2019). Simulación Física del flujo turbulento a sotavento de un edificio tipo monoblock con cubierta a dos aguas.

ISSN: 2992-8338

Aeroelastic study of a low power wind turbine

I. Martínez-Córdova*, L. Claudio*, E. Rosado-Tamariz*, R. Campos*, A. Blanco*, J. Hernández*

**Departamento de ingeniería mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México/ CENIDET. Inerior Internado Palmira*

Autor de correspondencia: M22CEO31@cenidet.tecnm.mx

Abstract: Wind energy, which transforms the power of a resource such as wind into electricity, is a sustainable and valuable bet for the future in urban and rural environments with low-power wind turbines. Wind turbine blades are the main elements of wind turbines and one of the components that are sometimes subjected to loads that cause fatigue failures or maximum loads. There is a lot of literature and methodologies to estimate the load on the Blades of high-power wind turbines, one of them is to study the aeroelastic response to which the main elements of a wind turbine are subjected, namely: blades, tower, and shaft. However, this is not the case for low-power wind turbines, which operate at higher rotation speeds and are subject to highly unstable aerodynamic loads as they are closer to the ground and in urban environments. In this article, the simplified load model described in the IEC 61400-2 standard is used to determine the main loads acting on a low-power wind turbine.

Keywords: Aeroelasticity; Wind turbine; Wind power

1. INTRODUCTION

Expertos alrededor del mundo señalan que el calentamiento global en el planeta tierra, está estrechamente relacionado con la sobreexplotación de los recursos naturales (Serna, 2020) lo cual, a su vez, lleva el agotamiento de las fuentes de energía convencionales (amdee, 2022, amdee, 2021). Por lo tanto, una de las fuentes de energía prometedora es la energía del viento. Los aerogeneradores son dispositivos que se utilizan para convertir energía cinética en eléctrica.

Uno de los principales retos del diseño de aerogeneradores es determinar las cargas principales a las que se encuentran sometidos sus elementos principales. En este trabajo se considera la norma IEC 61400-2 Requerimientos de Diseño para aerogeneradores de baja potencia (IEC 2013), para analizar los tipos de cargas que afectan su desempeño (Wang et al., 2016). Además, se consideró datos de velocidad del viento de la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca.

Las cargas en los diferentes escenarios de diseño que afectan a la vida útil de los aerogeneradores de gran y baja potencia, han sido objeto de numerosos estudios y son un campo relativamente complejo debido a la naturaleza de cargas aerodinámicas, las complejas propiedades y dificultades para medir con precisión la carga de servicio. (IEC-61400-2, 2019, IEC-61400-1, 2014). Las palas son el tema de mayor interés en la investigación, ya que son críticas para el funcionamiento del aerogenerador, estas están expuestas a una variedad de casos de carga y, por lo general, su producción es costosa. Los impulsores del diseño de palas de turbinas eólicas de baja potencia se centran en reducir el material y los costos de fabricación manteniendo al mismo tiempo la integridad de la estructura. Esto es necesario para garantizar un coste nivelado de energía (LCOE) competitivo en comparación con otros medios de micro generación, como la energía solar fotovoltaica (El khchine & Sriti, 2015)

2. Metodología

La Figura 1, muestra la metodología general utilizada para el desarrollo del trabajo.

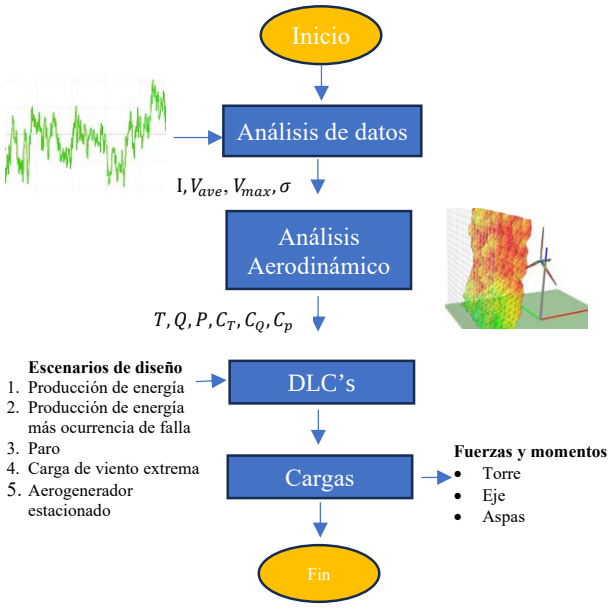


Figura 1. Metodología de cargas simplificadas.

ISSN: 2992-8338

2.1 Análisis de datos

Se realizó un análisis de una serie temporal con la finalidad de conocer el comportamiento del viento a diferentes alturas en la región del Istmo de Tehuantepec. Los datos que se muestran continuación superan los señalados por la norma IEC-61400-2 superando la intensidad de turbulencia (López-Villalobos et al., 2018) lo cual afecta al aerogenerador en el escenario de diseño A.

Una serie temporal es una variable estadística cuyos valores cambian en el tiempo, en nuestro caso, se estudia la velocidad del viento en función del tiempo. La base de datos estudiada tiene mediciones de intervalos de 10 minutos, durante un año (López Villalobos et al., 2018) estudió la intensidad de turbulencia para definir las condiciones de operación reales de los aerogeneradores instalados en esta zona.

Se utilizó el software R (R Core Team, 2020) programa estadístico de acceso libre, para realizar la programación de las diferentes velocidades de viento en esta zona, con la finalidad de encontrar variables estadísticas como pueden ser: intensidad de turbulencia, desviación estándar, velocidades máximas y mínimas, cizalladura del viento. También se pudo determinar la estabilidad atmosférica de esta zona.

Para estimar la intensidad de turbulencia y los valores de referencia, se emplea la ecuación (1), done se toma en cuenta la velocidad promedio y desviación estándar. De esta manera, se observa que los aerogeneradores instalados en la región del Istmo de Tehuantepec, deberían ser diseñados como clase especial, de acuerdo con la norma IEC (Evans et al., 2021, Evans, 2018).

$$I = \frac{v_{prom}}{\sigma} \tag{1}$$

Tabla 1. Parámetros básicos de la intensidad de turbulencia para el diseño de aerogeneradores según IEC 61400-2

Clases de turbinas de viento	I	II	II	Especial
Velocidad de referencia (m/s)	50	42.5	37.5	Diseño especial
A I_{ref}(-)		0.16		Diseño especial
B I_{ref} (-)		0.14		Diseño especial
C I_{ref}(-)		0.12		Diseño especial

2.2 Análisis aerodinámico basado en método BEM

El método BEM (Blade Element Moment) combina dos métodos de trabajo sobre el funcionamiento de un aerogenerador. El primer método, consiste en aplicar la teoría del momentum unidimensional sobre un disco actuador inmerso en un tubo de corriente. El segundo método, es la teoría del elemento de pala, que define los eventos aerodinámicos locales que ocurren sobre los perfiles aerodinámicos que componen una pala.

La teoría del elemento de pala examina las fuerzas aerodinámicas generadas por el perfil aerodinámico y las secciones a lo largo de la pala (Bukala et al., 2015, Ingram, 2017, Esfahanian et al., 2013). Entonces, se pueden obtener series de ecuaciones utilizando estos dos métodos, que pueden ser resueltas de forma iterativa.

En el método BEM, se utilizan los factores de inducción axial (a) y tangencial (a'), los cuales son resueltos en forma iterativa. Estas variables se pueden definir de la siguiente manera (Manwell et al., 2009, Burton et al., 2001).

$$a = \frac{1}{\frac{4sen^2\emptyset}{\sigma C_N} + 1} \tag{2}$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4sen\emptyset cos\emptyset}{\sigma C_T} - 1} \tag{3}$$

Donde, $\emptyset$ es el ángulo de entrada, C_T y C_N es el coeficiente de fuerza tangencial y normal, respectivamente; σ es la solidez que se define como la relación entre el área en planta de las palas y el área de barrido (Hansen, 2015, Bortolotti et al., 2022, Bontempo, & Manna, 2020) se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} \tag{4}$$

donde, c es longitud de la cuerda, B es el número de palas y r es el radio del disco actuador.
Los coeficientes de fuerza tangencial (C_T) y normal (C_N) en aerogeneradores se pueden calcular de la siguiente manera, donde se considera el coeficiente de sustentación y arrastre:

$$C_T = C_l sen\emptyset - C_D cos\emptyset \tag{5}$$

$$C_N = C_l cos\emptyset - C_D sen\emptyset \tag{6}$$

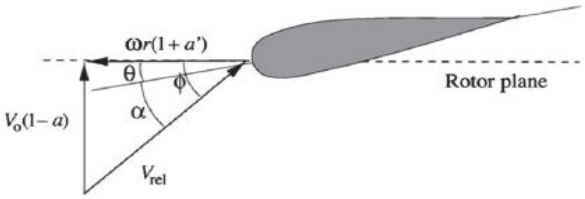


Figura 2. Componente de velocidad en el plano del rotor.

En la figura 2, se muestra el componente de velocidad en el plano del rotor.
donde β es un ángulo de giro de la pala, θ_p es un ángulo de paso de la pala, θ es la combinación del ángulo de giro β y el ángulo pitch θ_p.

$$\theta = \theta_p + \beta \tag{7}$$

El ángulo de ataque, α, es decir, entre la línea de cuerda del perfil aerodinámico y la velocidad relativa del viento, se puede obtener utilizando la siguiente ecuación:

$$\alpha = \phi - \theta \tag{8}$$

ISSN: 2992-8338

Después del cálculo del ángulo de ataque, se obtienen los coeficientes aerodinámicos de sustentación y arrastre del perfil y, posteriormente se puede obtener las curvas polares.

2.3 Diseño de un rotor

Es importante señalar el diámetro de rotor, la velocidad de punta, el ángulo de viento relativo y cuerda debe de calcularse con las siguientes ecuaciones.

$$\lambda_r = \lambda(\frac{r}{R}) \quad (9)$$

donde:

- λ_r= Relación de velocidad local (sección).
- λ= Relación de velocidad de punta de aspa.

Para calcular el ángulo relativo del viento se utiliza la siguiente ecuación:

$$\theta = (\frac{2}{3})\arctan(\frac{1}{\lambda_r}) \quad (10)$$

Mediante la siguiente ecuación se puede calcular la cuerda:

$$C = \frac{8\pi r}{Bc_l}(1 - cos\theta) \quad (11)$$

2.4 Diseño de casos de carga en un aerogenerador de baja potencia (DLC´s)

Tabla 2. Casos de carga de un aerogenerador según IEC 61400-2

Escenario de diseño	Caso de carga	Entrada de viento	Tipo de análisis
Producción de energía	A. Operación normal	$V_{hub} = V_{design}$	F
	B. Orientación		U
	C. Orientación más error		U
	D. Máximo empuje		U
Producción de energía más ocurrencia de falla	E. Máxima velocidad rotacional	$V_{hub} = V_{design}$	U
	F. Corto en la conexión de carga		U
Paro	G. Parada de frenado	$V_{hub} = V_{design}$	U
Carga de viento extrema	H. Carga de viento extrema	$V_{hub} = V_{e50}$	U
Estacionamiento y condiciones de falla	I. Carga de viento estacionada exposición máxima	$V_{hub} = V_{ref}$	U

La norma IEC 61400-2 puede considerarse como el estándar fundamental de diseño de aerogeneradores de baja potencia. Su propósito es especificar requisitos de diseño para garantizar la integridad de ingeniería del aerogenerador y para proporcionar un nivel apropiado de protección contra daños por todos los peligros durante la vida útil planificada.

Esta norma se ocupa de todos los subsistemas de las turbinas eólicas, como el control y la protección, mecanismos, sistemas eléctricos internos, sistemas mecánicos y estructuras de soporte.

Para realizar el diseño de un aerogenerador es necesario es definir los casos de carga. Estos se basan en los distintos estados operativos de la turbina, ya que se ven afectados por las condiciones del viento y posibles fallas eléctricas o del sistema de control de acuerdo con IEC 61400-2, el proceso de incorporación de cargas en el proceso de diseño consiste en lo siguiente:

- Determinar un rango de condiciones de viento de diseño.
- Especificar los casos de carga de diseño de interés, incluidas las condiciones de operación y viento extremo.
- Calcular las cargas para los casos de carga.
- Verificar que los esfuerzos debidos a las cargas sean aceptables.

De acuerdo con la norma, en la Tabla 2 se muestran los 10 casos de carga que comprende el método de cargas simplificadas. Se tiene en cuenta que solo el escenario de diseño producción de energía, en el caso de carga A conlleva a realizar un análisis de fatiga los restantes se evalúan con esfuerzos últimos.

2.5 Método de cargas simplificadas (SML)

El SLM es exclusivo del estándar IEC 61400-2 para turbinas eólicas pequeñas. Fue desarrollado como una alternativa al complejo y costoso modelo aeroelástico modelado que se realiza habitualmente para aerogeneradores de gran escala. El "costo" del SLM es confiable, pero su desventaja radica en los altos factores de seguridad, se ha validado mediante la metodología propuesta por (D. Wood, 2011). Su uso puede deducir comparativamente rápido las cargas de diseño de un aerogenerador. En este trabajo solo se aborda el caso de carga A, que se muestra en la tabla 2.

Descripción de casos de carga

- **Caso A.** Operación normal. *Fuerzas y momentos en las aspas.*

El caso A se enfoca en un análisis del comportamiento del aerogenerador, considerando cargas variables (fatiga) dando como resultado un daño que se produce en los elementos mecánicos, que se evalúa empleando la ecuación (12), y considera el efecto de la fuerza centrífuga ejercida en las aspas del aerogenerador.

$$F_{ZB} = 2m_B R_{cog}\omega^2 \quad (12)$$

Para determinar el momento en las aspas, se debe considerar el número de aspas del aerogenerador, así como su masa y torque, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$M_{xB} = \frac{Q_{Dis}}{N + 2m_B g R_{cog}} \quad (13)$$

Se utiliza la ecuación (14) para calcular el momento en las aspas, considerando la variable de velocidad de punta.

$$M_{yB} = \frac{\lambda_{Dis} \cdot Q_{Dis}}{N} \quad (14)$$

La carga de fatiga se considerará en el eje del rotor en el primer cojinete (más cercano al rotor). El rango de la tensión se calculará a partir de la combinación de los de carga de empuje, el momento de torsión y el momento de flexión.

Se utiliza la ecuación (15) para calcular la fuerza que actúa sobre el eje del rotor.

ISSN: 2992-8338

$$F_x = \frac{3}{2}\frac{\lambda_{Dis} Q_{Dis}}{R} \quad (15)$$

Se utiliza la ecuación (16) se puede calcular el momento de torsión que se está ejerciendo en el eje.

$$M_x = Q_{Dis} + 2m_r g e_r \quad (16)$$

Para finalizar el cálculo de fuerzas y momentos se emplea la ecuación (17) para calcular el momento flector en el eje.

$$M_{eje} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} F_x \quad (17)$$

3. Resultados y discusiones

Con la finalidad de conocer el comportamiento del viento a diferentes alturas del aerogenerador estudiado, se realizó un análisis de una serie temporal, con variables estadísticas como: intensidad de turbulencia, desviación estándar, velocidad promedio, densidad espectral de potencia coherencia y estabilidad atmosférica. En la Figura 3 y 4, se observan las velocidades del viento de la región medida a dos alturas diferentes en el aerogenerador.

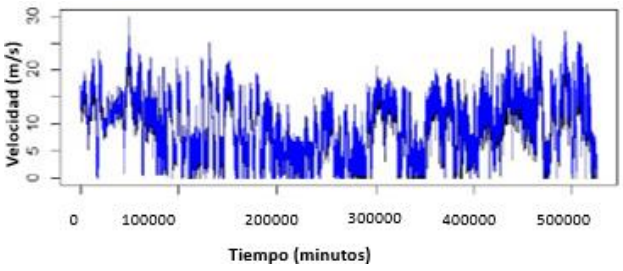


Figura 3. Serie temporal anual, a nivel superior 40.5m.

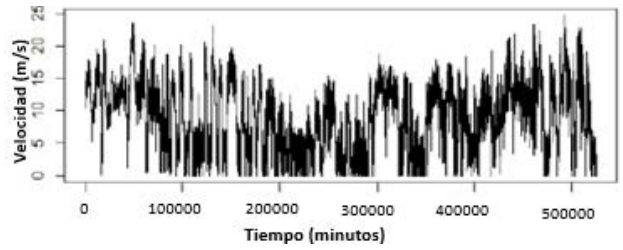


Figura 4. Serie temporal anual, a nivel inferior 17.8m.

En la Tabla 3, se puede observar que, a mayor altura superior del aerogenerador la velocidad máxima aumenta. Por ello, la intensidad de turbulencia supera los valores de referencia de la Norma IEC.

Tabla 3. Datos de velocidad de viento anuales Altura superior

Intensidad de turbulencia	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Velocidad promedio	Desviación estándar
1.80	0(m/s)	29.98 (m/s)	10.16 (m/s)	5.63

Como se muestra en la tabla 3 y tabla 4, existe un aumento de velocidad máxima a una mayor altura, por ello se debe considerar la velocidad promedio de la altura superior como condición de entrada para realizar los cálculos mediante el método SLM.

Tabla 4. Datos de velocidad de viento anuales Altura inferior

Intensidad de turbulencia	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Velocidad promedio	Desviación estándar
1.70	0 m/s	24.76 m/s	9.19 m/s	5.17 m/s

Se utilizó el software QBlade (Jonkman & Buhl, 2005, Moesus, 2013, Laino, 2013) especializado en aerogeneradores, la finalidad es realizar el rotor aerodinámico del aerogenerador, la evaluación del perfil NACA 4412 a diferente número de Reynolds, así como el comportamiento del coeficiente de sustentación y arrastre. Lo que se busca es un coeficiente de sustentación óptimo para generar la mayor energía posible, dicho coeficiente se calcula de manera numéricamente basado en el método BEM.

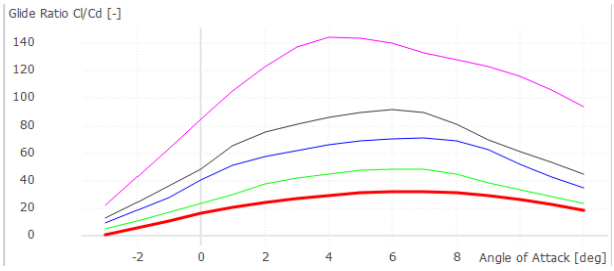


Figura 5. Coeficiente de sustentación vs coeficiente de arrastre.

Ncrit, abreviatura de factor de amplificación crítico, es un parámetro utilizado para controlar la transición entre flujo laminar y turbulento sobre la superficie del perfil aerodinámico. La elección del valor Ncrit puede afectar significativamente los coeficientes de resistencia y sustentación calculados, ya que el flujo turbulento generalmente tiene una mayor resistencia por fricción superficial en comparación con el flujo laminar. En la figura 4 se ha modificado el número crítico para obtener un comportamiento óptimo de los coeficientes aerodinámicos considerando parámetros de rugosidad de los perfiles.

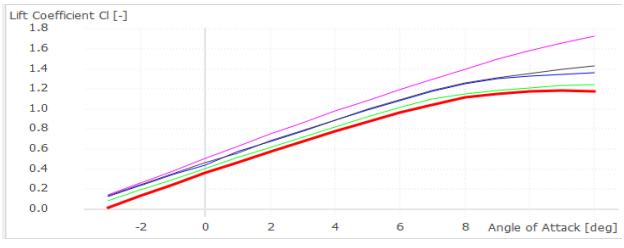


Figura 6. Relación Cl vs ángulo de ataque evaluado a diferente número de Reynolds.

ISSN: 2992-8338

Se tiene en cuenta que se debe usar el coeficiente de sustentación óptimo para realizar los cálculos de la cuerda de un perfil, en este caso el coeficiente de sustentación optimo se utiliza a 1.4 con un numero de Reynolds de 330,000 recordando que se modificó el factor de amplificación número critico considerando turbulencia en el perfil NACA 4412.

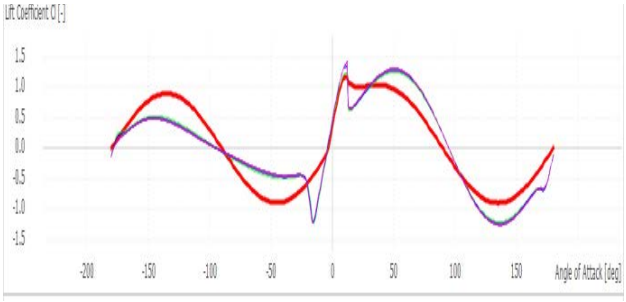


Figura 7. Relación Cl vs ángulo de ataque optimo.

Como se ha mencionado anteriormente, lo que se busca es que el perfil prácticamente no oponga resistencia ante el coeficiente de sustentación. A continuación, se muestra una gráfica donde el coeficiente se arrastre se puede apreciar que esta aproximado a cero, que en este caso sería ideal para un coeficiente de potencia no superior al límite de Betz (a=1/3).

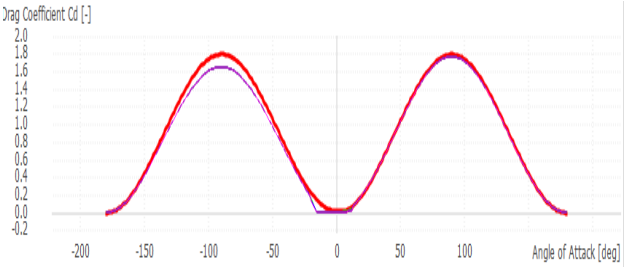


Figura 8. Relación Cd vs ángulo de ataque.

Empleando las ecuaciones de la sección 2.3 diseño de un rotor podemos realizar el cálculo de cuerda y el ángulo de torcimiento, los parámetros calculados se introducen al software para poder realizar el diseño del rotor.

	Pos (m)	Chord (m)	Twist (deg)	Foil	Polar
1	0.000	0.200	0.000	Circular_Foil	Circular_Foli_CD1
2	0.200	0.213	27.750	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
3	0.300	0.181	17.210	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
4	0.400	0.151	12.460	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
5	0.500	0.127	9.280	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
6	0.600	0.11	7.040	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
7	0.700	0.096	5.380	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
8	0.800	0.085	4.110	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
9	0.900	0.076	3.100	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V
10	1.000	0.069	2.290	NACA 4412	NACA_4412_Re...360V

Figura 9. Parámetros de diseño para el rotor.

El rotor consta de 10 perfil NACA evaluados a un mismo número de Reynolds, considerando un número critico de 4, donde presentará turbulencia al momento de adherirse el flujo a los perfiles, pero mantendrá un coeficiente de sustentación permisible, para producir energía.

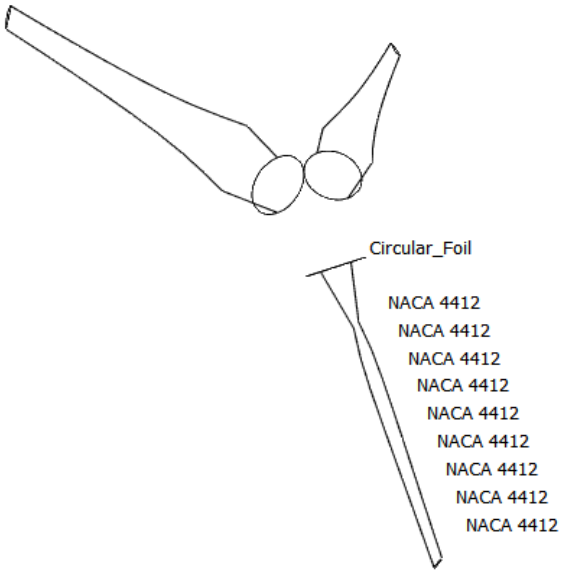


Figura 10. Diseño de n rotor con perfiles y distancias.

Es importante señalar que se comienza con un perfil circular debido a que en la raíz es donde se concentran mayoría de esfuerzos por ende dicha parte puede ser de mayor robustes, la selección de materiales no se discute en este trabajo. Se puede observar la distribución de cuerda y la longitud que se coloca el perfil NACA 4412.

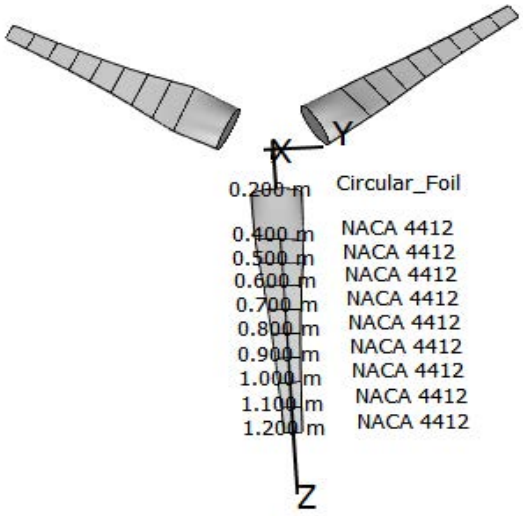


Figura 11. Diseño de un rotor aerodinámico.

ISSN: 2992-8338

A continuación, se muestran las principales cargas ejercidas en las palas y eje del aerogenerador.

Tabla 5. Resultados de fuerzas y momentos en las aspas

Ecuación	Descripción en palas	SLM	Unidades	Símbolo
(12)	Fuerza centrifuga (Z_{eje})	1629.23	N	F_{Zb}
(13)	Lead-lag momento de flexión (X_{eje})	6.75	Nm	M_{xB}
(14)	Flapwise momento de flexión (Y_{eje})	25.55	Nm	M_{yB}

Tabla 6. Resultados de fuerzas y momentos en el eje del rotor

Ecuación	Descripción en el eje	SLM	Unidades	Símbolo
(15)	Empuje en el eje (x_{eje})	118.55	N	F_{x-eje}
(16)	Momento del eje sobre el (X_{eje})	11.70	Nm	M_{x-eje}
(17)	Momento del eje	21.20	Nm	M_{eje}

4. Conclusiones

Los resultados del análisis de la velocidad de viento de la zona del Istmo de Tehuantepec superan los valores de referencia establecidos en la norma IEC 61400-2, cayendo dentro de la clase especial para el diseño de aerogeneradores de pequeña escala. Por lo que, si un aerogenerador se instala en esta zona, se debe considerar requisitos de diseño establecidos por el fabricante, para realizar un diseño estructural.

Se ha realizado un análisis simplificado para estimar las cargas principales en un aerogenerador, se toma en cuenta la velocidad promedio máxima de la zona, se debe multiplicar esa velocidad por el factor de ráfaga para que el aerogenerador sea diseñado bajo la velocidad de diseño, no con la velocidad promedio.

El uso del método simplificado significa que las cargas de diseños se pueden deducir comparativamente rápido a costa de altos factores de seguridad. Se ha observado en la literatura que el método SLM presenta una barrera para los pequeños desarrolladores eólicos que pueden correr el riesgo de sobre diseñar componentes. Por otra parte, los factores aerodinámicos juegan un papel importante en este artículo, debido a que se modifica el factor de amplificación dando como resultado un flujo turbulento, pero en condiciones para generar una sustentación aceptable con un numero de Reynolds de 330,000 en un perfil NACA 4412.

Referencias

Asosiación Mexicana de Energía Eólica (2022). *Informe anual amdee 2022*.

Asosiación Mexicana de Energía Eólica (2021). *Informe anual amdee 2021*.

Bontempo, R., & Manna, M. (2020). Diffuser augmented wind turbines: Review and assessment of theoretical models. Applied Energy, 280, 115867.

Bortolotti, P., Ivanov, H., Johnson, N., Barter, G. E., Veers, P., & Namura, N. (2022). Challenges, opportunities, and a research roadmap for downwind wind turbines. *Wind Energy*, 25(2), 354-367.

Bukala, J., Damaziak, K., Kroszczynski, K., Krzeszowiec, M., & Malachowski, J. (2015). Investigation of parameters influencing the efficiency of small wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146, 29-38.

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.

David, W. (2011). *Small Wind Turbines–Analysis, Design, and Application. Introduction to Wind Turbine Technology*.

Esfahanian, V., Pour, A. S., Harsini, I., Haghani, A., Pasandeh, R., Shahbazi, A., & Ahmadi, G. (2013). Numerical analysis of flow field around NREL Phase II wind turbine by a hybrid CFD/BEM method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 120, 29-36.

Evans, S., Dana, S., Clausen, P., & Wood, D. (2021). A simple method for modelling fatigue spectra of small wind turbine blades. *Wind Energy*, 24(6), 549-557.

Evans, S. (2018). Evaluation of the IEC Simplified Fatigue Load Equations for Small Wind Turbine Blades: ¿How Simple is Too Simple? *Renewable energy*, (127), pp. 24-31,

Hansen, M. (2015). *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge.

IEC 61400-2 wind turbines (2019) Part 2: *Design requirements for small wind turbines*.

IEC 61400-1 (2014) Parte 1*: Requerimientos de diseño*. Ginebra Suiza.

Ingram*, ''Wind TurbineBlade Analisys Using the Blade Element Momentum Method Report,''* Durham University, 2017.

Jonkman, J. M., & Buhl, M. L. (2005). *FAST user's guide* (Vol. 365, p. 366). Golden, CO, USA: National renewable energy Laboratory.

Lopez-Villalobos, C. A., Rodriguez-Hernandez, O., Campos-Amezcua, R., Hernandez-Cruz, G., Jaramillo, O. A., & Mendoza, J. L. (2018). *Wind turbulence intensity at La Ventosa, Mexico: a comparative study with the IEC61400 standards*. Energies, 11(11), 3007.

Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.

Moesus, N. (2013). *Erstellung eines Windfeldgenerators und einer Schnittstelle für Struktur und Aerodynamik Simulation von Windenergieanlagen*.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Serna, l. a. (2020). Harvesting the wind: the politicalecology of wind energy in the isthmus of tehuantepec, oaxaca. The University of Manchester.

Sriti, M. (2021). Performance evaluation of wind turbines for energy production in Morocco's coastal regions. *Results in Engineering*, 10, 100215.

Wang, L., Quant, R., & Kolios, A. (2016). Fluid structure interaction modelling of horizontal-axis wind turbine blades based on CFD and FEA. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 158, 11-25.

ISSN: 2992-8338

Sugarcane Bagasse Pretreatments for Second Generation Bioethanol Production

A.-S. Santana-Marquina * **V.-M. Alvarado-Martínez** *
M.-G. López-López *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*
e-mail: m22ce066@cenidet.tecnm.mx

Abstract:
This paper aims to give insights into relevant features of sugar cane bagasse pretreatments, as this stage is critical in the production line of second-generation bioethanol. The efficacy of pretreatments depends on the type of biomass and operational factors. The pretreatment rating relies on the final product's purity, production time, and total cost of processes. The assessment must account for the aspects of the hydrolysis and fermentation for simultaneous or separate modes. This literature review sheds light on the biomass handling procedures required before and after pretreatment and reveals the significant variables in the pretreatment sequence. This study also makes patent the significance of the pretreatment influence on the product quality.

Keywords: Bioethanol, Pretreatment, Second generation.

1. INTRODUCCIÓN

El interés actual es desarrollar formas más eficientes y menos contaminantes para obtener combustibles. El reporte de la Energy Information Administration (2021) muestra que un 40.4% de la energía que se consumió en el mundo durante el 2019 provino de petróleo, el 19.7% de electricidad, el 16.4% de gas natural, un 9.5% de carbón y 3.6% de otros tipos de energía, finalmente solo el 10.4% provino de biocombustibles y residuos. Además, el uso incesante de combustibles fósiles ha provocado una disminución constante de estos recursos, y se estima que podrían agotarse en unas cuantas décadas. Por lo tanto, a nivel mundial se están considerando nuevas fuentes energéticas que proporcionen una menor huella de carbono. La biomasa es un recurso renovable que puede usarse para producir combustibles sólidos como pellets de madera, gaseosos como el metano, o líquidos como el etanol o el diésel.

El etanol, en particular, reduce emisiones de monóxido de carbono al usarse como biocarburante. En el año 2000 sólo siete países consumían etanol combustible. Actualmente, al menos 51 países lo consumen y su uso a nivel mundial ha crecido más que el de la gasolina. Entre 1981 y 2021 el consumo de bioetanol pasó de 1,200 millones de galones a 26,889 millones de galones (Ramsey et al., 2023), (Energy Information Administration, 2023). Todavía se prevé un aumento importante del uso de bioetanol. El mercado mundial del etanol se valoró en 99,060 millones de dólares en 2022 y la predicción para 2032 es que supere los 162,120 millones de dólares (Precedence Research, 2023). Para imponerse, la tecnología de producción de bioetanol debe diversificarse y aprovechar la biomasa de manera sostenible. Esto se puede lograr a través de la intensificación de procesos, que consiste en diseñar y poner en marcha procesos novedosos, eficientes y limpios. Un proceso que usa residuos y materiales de poco valor como materia prima para generar un producto de alto valor como un combustible, puede ser considerado como intensificado. Las desventajas de este tipo de procesos son menor rendimiento y requerimiento de tratamientos adicionales de la biomasa. Como ventajas se obtienen una menor huella de carbono, aprovechamiento más sostenible de biomasa renovable, menor costo y diversificación de la tecnología de combustibles. En la literatura se presentan avances sobre la producción de combustibles a partir de distintos tipos de biomasa, y utilizando diferentes modos de procesamiento, sus resultados contribuyen al desarrollo y mejora de la tecnología de biocombustibles. Dado que en su mayoría, en la literatura se encuentran estudios basados en pruebas a nivel de laboratorio, se mantienen varios retos para su aplicación en la industria. El objetivo de este artículo es hacer una revisión de técnicas para obtener bioetanol de segunda generación, es decir, bioetanol producido de residuos agroindustriales, urbanos o forestales. La etapa crítica de la transformación de este tipo de biomasa es la preparación de la materia prima, previa a la etapa de fermentación. Los pretratamientos cambian la estructura lignocelulosica, favoreciendo la acción enzimática y en consecuencia los azúcares fermentables de la biomasa pueden ser metabolizados (Fernández Delgado, 2016). La revisión se centra en el procesamiento de bagazo

ISSN: 2992-8338

de caña. De los artículos citados a continuación se revisan las etapas y procedimientos, así como las variables importantes que intervienen en el proceso. El contenido del artículo se organiza en secciones en las que se presentan conceptos de base en el tema, se describen las características de la biomasa de segunda generación, y los principales tipos de pretratamientos que permiten adecuar la biomasa. Cada artículo contiene información que puede servir de base para crear nuevos experimentos y avanzar en las tecnologías de producción de biocombustibles.

2. CONCEPTOS

Se presentan los conceptos introductorios al tema de producción de bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de caña de azúcar.

2.1 Bioetanol

Este combustible también conocido como alcohol etílico puede ser utilizado como sustituto de gasolina, así como potenciador de esta. El combustible es considerado ecológico, su ciclo inicia con la producción del biocombustible, que al ser quemado libera dióxido de carbono, después, las plantas consumen este gas, y por último, estas plantas son utilizadas para generar más biocombustible (Castro-Martínez et al., 2012). Ya que no es un compuesto tóxico, ni contaminante, el uso de etanol proveniente de biomasa tiene ventajas frente a combustibles fósiles. Por otro lado, es posible producir bioetanol de segunda generación en grandes cantidades, ya que este se obtiene de la fermentación de residuos o desechos orgánicos, es decir, se trata de una producción que no compite con la industria de alimentos, como en el caso de la producción de bioetanol de primera generación. La fermentación de biomasa lignocelulósica proporciona hidratos de carbono que posibilitan adaptabilidad de este producto para ser sustituto de gasolina en motores de encendido por chispa (Ballesteros, 2002).

2.2 Lignocelulosa

Proveniente de la fotosíntesis, la lignocelulosa es uno de los tipos de biomasa más abundantes. Este material forma la pared celular de las plantas y su composición y contenido varían según la edad y etapa de crecimiento de las plantas (Cuervo et al., 2009). La lignocelulosa está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, por lo tanto es una fuente de carbono y de energía renovable (Portal et al., 2014). Es viable utilizar este material por su bajo costo, su alta disponibilidad y aprovechamiento variado. Industrias, como la de producción de whisky, o proyectos verdes usan lignocelulosa como ingrediente (Jara Huacacolqui et al., 2022). También se aprovecha en la producción de biocombustible y bioaceites.

2.3 Bagazo de caña

El material es recuperado de la producción de azúcar, se obtiene del triturado por el cual se saca el jugo de la caña. Ya que esta biomasa es un desecho agroindustrial (Figura 1) tiene distintos tipos de usos, en general es quemada, pero también se aprovecha en la generación de biocombustible. Esta biomasa constituye un 28% del peso de la caña, y está compuesta por un 45% de fibra, 2-3% de solidos insolubles y otro mismo porcentaje de sólidos solubles, finalmente, cerca del 50% es agua (Olmo et al., 2015). El bagazo representa el material de mayor peso y volumen en la producción de azúcar de caña, ya que se generan en promedio 270 kg por tonelada de caña procesada (Pérez et al., 2022).

Fig. 1. Bagazo de caña.

2.4 Pretratamientos

A diferencia de la materia prima para obtener el bioetanol de primera generación, la biomasa de segunda generación no es directamente fermentable. Se requiere aplicar un pretratamiento que ayude a degradar la materia, debido a que la lignina en las paredes celulares de la planta crea barreras contra en ataque enzimático. El procesamiento de biomasa lignocelulósica complementa la hidrólisis enzimática y ayuda a que los azúcares contenidos en la biomasa puedan ser metabolizados por microorganismos fermentadores (Riaño, 2010) (ver Figura 2).

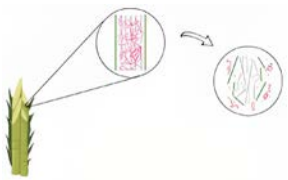


Fig. 2. Efecto del pretratamiento de biomasa lignocelulósica.

El pretratamiento con NaOH es uno de los más utilizados como pretratamientos alcalinos, este promueve la hidrólisis (Espinosa Negrín et al., 2021). Una desventaja de este es la pérdida de celulosa y hemicelulosa, y la reducción de azúcares y bioetanol. En general, el pretratamiento alcalino genera menos inhibidores y favorece la deslignificación, en comparación con tratamiento con ácidos, según Valles Sáez (2022). Los pretratamientos con

ISSN: 2992-8338

álcalis y ácidos se clasifican dentro de los químicos y forman parte de los más aplicados. Sin embargo, existe una variedad grande de tratamientos químicos.

También hay pretratamientos biológicos en los que comúnmente se usan microorganismos, hongos, y enzimas que promueven la degradación de la lignina. El uso de hongos en este tipo de procesos ayuda a descomponer la lignina. En general, estos pretratamientos tienen bajo consumo energético en su implementación, (González, 2018).

En la Tabla 1 se listan los principales pretratamientos, cuya aplicación se reporta en diferentes investigaciones sobre la producción de bioetanol de segunda generación. Aditiya et al. (2016) y Nasution et al. (2022) ofrecen dos revisiones completas sobre pretratamientos de biomasa para la producción de bioetanol.

Table 1. Tipos de pretratamiento (Aditiya et al., 2016)

Tipo de pretratamiento	Método
Ácido	Percolación de amoníaco reciclado Ácido diluido Ácido concentrado Explosión de CO2 Hidrólisis ácida
Térmico	Expolición de vapor Agua caliente
Biológico	Bacterias Hongos
Alcalino	liquido iónico Hidrólisis alcalina
Químico	Ozonólisis Proceso con disolventes orgánicos Oxidación húmeda
Mecánico	Trituración Pirólisis Microondas

2.5 Sacarificación enzimática de la biomasa pretratada y la fermentación separadas

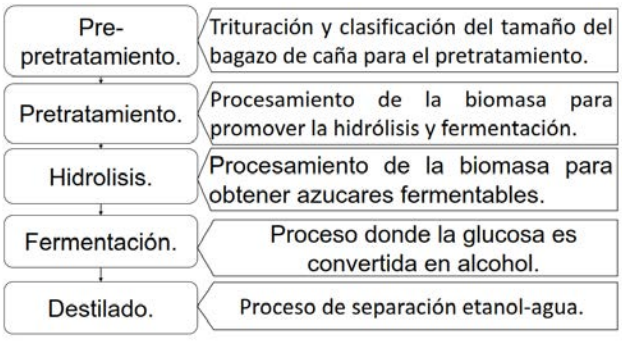


Fig. 3. Diagrama de Hidrólisis y fermentación separadas

Los procesos de sacarificación enzimática y fermentación (SHF, en inglés) se realizan por separado debido a que la temperatura en estas etapas es diferente. Para mantener las enzimas hidrolíticas se requiere un promedio de 50 °C, y una temperatura más baja en el caso de la fermentación de 30 °C-32 °C. La producción de biocombustible por etapas separadas necesita un pretratamiento para poder efectuar la hidrólisis y posteriormente una fermentación de la biomasa resultante (Choudhary et al., 2016). En la Figura 3 se muestran las etapas de un proceso en modo SHF.

2.6 Sacarificación y fermentación simultáneas

Otro modo de producción de etanol es llevando a cabo la sacarificación al mismo tiempo que la fermentación. La producción de etanol con microorganismos muy usados en la industria, como Saccharomyces cerevisiae (levadura), tiene la ventaja de mejorar la eficiencia de la sacarificación enzimática, y en consecuencia, el rendimiento de etanol. De igual manera este modo de producción facilita mantener la concentración de glucosa en un nivel bajo para lograr una co-fermentación eficiente. El proceso que combina la hidrólisis y la fermentación produce mayor cantidad de enzimas y elimina el problema de inhibición de la fermentación.

Se pueden usar enzimas hidrolíticas que son adaptables al frío, o levaduras termófilas que se activan a altas temperaturas y en estas condiciones ocurre la fermentación (Choudhary et al., 2016).

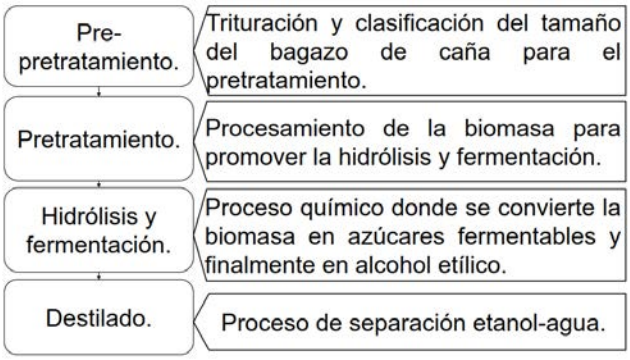


Fig. 4. Diagrama de sacarificación y fermentación simultanea

3. PRETRATAMIENTOS PROBADOS PARA BAGAZO DE CAÑA

3.1 Pretratamiento alcalino

El pretratamiento alcalino consiste en sumergir un material lignocelulósico en una solución alcalina bajo ciertas condiciones de temperatura, concentración, y tiempo de tratamiento. Los álcalis más usados son hidróxido de

ISSN: 2992-8338

sodio (NaOH), de potasio (KOH) o de amonio (NH_4OH). Estos compuestos rompen los enlaces entre la lignina y los carbohidratos, o solubilizan parcialmente la lignina (Galbe and Zacchi, 2012). Enseguida se describen algunas investigaciones sobre pretratamientos alcalinos como medio para favorecer la hidrólisis enzimática de la biomasa, que para la actual revisión es el bagazo de caña.

Nasution et al. (2022) presentó una revisión de los pretratamientos más usados en los últimos años. Como pretratamiento alcalino se destaca el uso del NaOH. Comúnmente se recomienda manejar una concentración al 2 % de NaOH, una relación de agua destilada de 1:10 solido-liquido, y una temperatura de operación de 80 °C, así como un tiempo de tratamiento de 2h.

En un estudio afin, Arturo et al. (2022) utilizó como biomasa bagazo de caña para producir bioetanol con dos modos diferentes de producción: sacarificación enzimática y fermentación en etapas separadas (SHF), y Sacarificación y fermentación simultáneas (SSF). Se probaron 4 tipos de pretratamientos de la materia prima, entre estos se aplicó un pretratamiento alcalino usando como base NaOH al 2 % p/v y una carga de bagazo del 4% p/v. El pretratamiento se llevó a cabo a 97°C durante un tiempo de 90 minutos. Al finalizar este tiempo, la biomasa tratada se acondicionó mediante etapas de enjuagado, filtrado y secado para después ser procesada por cada modo de producción, SHF o SSF. Comparando el porcentaje de alcohol obtenido a partir de cada proceso (SHF o SSF), se concluyó que el proceso SHF obtuvo un producto más concentrado, con 15 % de alcohol, mientras que el producto del proceso SSF tenía un contenido de alcohol menor de 11 %. En contra parte se concluyó que el proceso SSF reduce en un 80% el tiempo consumido por el proceso SHF.

3.2 Pretratamiento ácido

El pretratamiento ácido se realiza impregnando en un ácido diluido el material lignocelulósico. Comúnmente se usan ácidos minerales como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), que fragmenta los componentes de la biomasa en moléculas más pequeñas (Galbe and Zacchi, 2012). Como ejemplo se citan los siguientes estudios. Regresando al trabajo de Arturo et al. (2022), entre los pretratamientos que se presentaron está también uno con ácido sulfúrico (H_2S0_4) y agua destilada. Para este caso se efectuaron experimentos con 3 porcentajes de carga de biomasa (4%, 6%, 8%) a temperatura máxima de 97°C y con duración de 60 minutos. Para el proceso SSF se obtuvo un producto con 7 % de alcohol, es decir un rendimiento menor que el obtenido con el pretratamiento alcalino desarrollado en el mismo trabajo para bagazo de caña.

Otro trabajo sobre producción de bioetanol con bagazo de caña pretratado con ácido es el de Tantayotai et al. (2022), quienes compararon la efectividad de dos ácidos, uno orgánico y otro mineral. Como resultado, se concluyó que el pretratamiento con ácidos orgánicos fue más efectivo porque se logró mayor rendimiento.

Rojas (2010) y sus colaboradores también expusieron sus resultados para 3 pretratamientos de bagazo de caña, incluido uno ácido. Su objetivo fue comparar el impacto ambiental de los tres pretratamientos. Al igual que en los trabajos antes citados, el pretratamiento se hizo con H_2SO_4. Se usó el ácido al 1.5 % en peso y se procesó a 160°C. Se obtuvo como resultado la degradación del 90% de la hemicelulosa y una completa solubilidad de la lignina. Después del pretratamiento se efectuaron la fermentación, la destilación y la purificación del producto. La etapa de SSF se concluyó con un rendimiento de 85 % de la sacarificación y fermentación de la celulosa, mientras que el rendimiento del proceso SHF fue de 75 % con respecto a la fermentación de azucares. Finalmente, se concluyó que al comparar los tres tipos de pretratamientos efectuados, el ácido no se encuentra entre los mas contaminantes.

3.3 Pretratamiento térmico

Regresando al trabajo de Rojas (2010), otro de los pretratamiento probados para el bagazo de caña fue un pretratamiento térmico en condiciones de temperaturas y presiones elevadas, de 220 °C y 22.9 atm. Al analizar los niveles de contaminación de los pretratamientos, se concluyó que dada la cantidad de energía que se requiere para llegar a altas temperaturas, el pretratamiento térmico resultó el más contaminante.

El trabajo de Moonsamy et al. (2022) tuvo como objetivo lograr una producción autosustentable, creando distintos escenarios. Un aspecto escencial de su análisis fue explorar la vialidad de combinar procesos de primera y segunda generación a partir de melazas y material lignocelulósico provenientes de la caña de azúcar. El pretratamiento propuesto fue el de explosión de vapor. Este consiste en hacer pasar una corriente líquida de hemicelulosa con una parte solida de celulosa y lignina. Posteriormente, dependiendo del escenario se realizó una SSF o una SHF. La conclusión fue que la ventaja del proceso combinado es su factibilidad económica, el reto es evitar la inhibición o supresión de la glucosa.

3.4 Otros Pretratamientos Químicos

Entre la gran variedad de pretratamientos químicos está el de la ozonólisis, que consiste en inyectar una corriente de ozono. Como ejemplo se cita el trabajo de Travaini et al. (2016), quienes usaron un generador de ozono. Se realizó un pre-pretratamiento que consistió en lavar el bagazo de caña y después secar a 42 °C, para finalmente pasarlo por una etapa de molienda y obtener partículas de 3 mm. Para el pretratamiento que le siguó, la cantidad de biomasa utilizada fue de 24 ± en 1 g. El bagazo de caña se hidrató previamente con agua destilada, y se fijó un caudal de oxígeno al reactor, durante 15 min. El modo de producción de bioetanol fue por SHF. Asimismo se

ISSN: 2992-8338

estudió el efecto de la humedad del bagazo de caña para determinar el tiempo de ozonólisis.

Otro tratamiento químico fue presentado por Valladares-Diestra et al. (2020). El procesamiento de la biomasa también requirió una molienda previa, que para el caso en estudio permitió probar tamaños de partículas de 0.85 mm y 0.35 mm. Después, el pretratamiento del bagazo de caña lo hicieron con un solvente verde, imidazol, mezclando con agitación mecánica en un reactor con capacidad de 150 ml. La cantidad de bagazo que utilizaron fue de 5 g de biomasa seca y una relación 1/9 partes de biomasa/imidazol. El pretratamiento fue realizado a 120°C y 160°C, con tiempos de 1 h y 3 h. Después del pretratamiento se acondicionó la biomasa por medio de un enjuagado con agua desionizada durante 1 h, a 90°C. El siguiente paso fue filtrar la biomasa al vacío y se precipitó con 3 volúmenes de etanol, se realizó nuevamente el proceso de filtrado y un enjuagado con 96% $vv^{-}1$ etanol, finalmente la biomasa se secó a 45°C en una estufa con circulación de aire. El modo de procesamiento de la biomasa fue a través de SHF con duración de 24 h. Como resultado se observó que las condiciones de temperatura y tiempo que mejor promovieron la producción de azucares fueron 160 °C y 1 h, respectivamente. Se obtuvieron de 107 g a 402 g de glucosa en la etapa de hidrólisis. Durante la etapa de fermentación se observó un aumento en la obtención de etanol de 275.7% con respecto al procesamiento del bagazo de caña no pretratado.

En el artículo de Ardila Nuñez (2021) se aplicó un pretratamiento oxidativo con peróxido de hidrógeno para bagazo de caña. Las variables que tomaron en cuenta fueron la humedad de la biomasa, la temperatura y el tiempo de pretratamiento. La humedad fue de 9.3 %, en el rango de lo reportado en la literatura. Como resultado del experimento se obtuvo un 14% del rendimiento total de la biomasa hidrolizada.

Pantoja-Matta et al. (2015) experimentaron con bagazo de caña y con otros tipos de biomasa, como polvillo de fique y afrecho de yuca. Como pre-pretratamiento secaron la biomasa y redujeron su tamaño de partícula. Después se compararon dos pretratamientos, uno químico oxidante con bisulfito de sodio $Na(SO_3)_2$ al 4% p/p, y otro enzimático, usando enzima lacasa al 1% p/p. Se concluyó, que el bagazo de caña sometido al pretratamiento químico logró más deslignificación y obtuvo la mayor cantidad de celulosa, alcanzando el 51.48% y los resultados fueron más favorables que los obtenidos con otras biomasas.

3.5 Producción de bioetanol sin pretratamiento

En el artículo de Gomes-da Silva et al. (2022) se analizaron tres configuraciones para fermentación de bagazo de caña, ante diferentes condiciones de operación en modo por etapas separadas. Con un primer análisis se evaluó la influencia de la humedad, comparando la efectividad del proceso para humedades de la biomasa del 40% y 60%. Se concluyó que con menor humedad, el rendimiento de bioetanol aumenta. En un segundo análisis se evaluó el efecto de la velocidad de dilución durante la fermentación. El resultado fue que a mayor velocidad, el producto tiene mayor concentración de etanol. Por último se implementó una SSF, en la que se alcanzó un rendimiento bioetanol/bagazo del 12.5%.

4. CONCLUSIÓN

En este artículo se hace una revisión sobre los pretratamientos que la biomasa lignocelulósica, como el bagazo de caña, necesita para posibilitar la acción enzimática en la hidrólisis de la biomasa. En conclusión, la producción de bioethanol de segunda generación requiere etapas de acondicionamiento de la biomasa antes y después del pretratamiento. La adecuación de materia prima consiste en obtener tamaños de partícula que permitan el manejo de la biomasa. Después del pretratamiento se requieren, por ejemplo, etapas de enjuagado, secado, hidratación, filtrado, o precipitación. Asimismo, para diseñar el proceso se estudia la influencia de la temperatura, humedad, carga de biomasa, tiempo y concentración de agentes externos. Otros factores a definirse son niveles de pH, presión, o flujo de alimentación de alguna substancia. En resumen, la viabilidad y efectividad del pretratamiento se evalúa en función de la concentración de etanol en el producto, del tiempo de procesamiento y de su costo. Se prevé que en un futuro cercano los biocombustibles sean producidos a gran escala y sean utilizados como biocarburantes, obteniendo una menor huella de carbono, dado su naturaleza renovable. Por lo tanto, la investigación de nuevas técnicas de producción, mejoradas con técnicas de control, propiciarán que el bioetanol pueda ser producido y utilizado a gran escala.

REFERENCES

Aditiya, H., Mahlia, T., Chong, W., Nur, H., and Sebayang, A. (2016). Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 631–653. doi: 10.1016/j.rser.2016.07.015.

Ardila Nuñez, D.Y. (2021). *Evaluación del pretratamiento oxidativo con peróxido de hidrógeno sobre cascarilla de café y bagazo de caña de azúcar a escala de laboratorio, para la producción de bioetanol de segunda generación.* Ph.D. thesis, Universidad Santo Tomás.

Arturo, F.A., Alvarado, V.M., and López, G.L. (2022). Evaluación experimental de las variables con mayor impacto en el proceso de producción de bioetanol de segunda generación. In *Tecnología y Ciencia Aplicada*, volume 5 of *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, 222–227. CENIDET, Cuernavaca, México.

Ballesteros, I. (2002). Proceso de sacarificación y fermentación simultánea para la conversión de la fracción celulósica del residuo de la extracción del aceite de oliva en etanol. *Grasas y Aceites*, 53, 282–288.

Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L.I., and Ortiz-Ojeda, J.C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol

ISSN: 2992-8338

una alternativa sustentable a la crisis energética. *Ra Ximhai*, 8(3), 93–100.

Choudhary, J., Singh, S., and Nain, L. (2016). Thermotolerant fermenting yeasts for simultaneous saccharification fermentation of lignocellulosic biomass. *Electronic Journal of Biotechnology*, 21, 82–92. doi: 10.1016/j.ejbt.2016.02.007.

Cuervo, L., Folch, J.L., and Quiroz, R.E. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *BioTecnología*, 13(3), 11–25.

Energy Information Administration (2021). Key world energy statistics 2021. Technical report, Paris. URL `iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021`.

Energy Information Administration (2023). Monthly energy review. Technical Report DOE/EIA-0035(2023/10), US EIA.

Espinosa Negrín, A.M., López González, L.M., and Casdelo Gutiérrez, N.L. (2021). Pretratamiento de biomasas lignocelulósicas: Breve revisión de los principales métodos utilizados. *Centro Azúcar*, 48(3), 108–119.

Fernández Delgado, M. (2016). Pretratamiento de ozonolisis de bagazo de caña. Technical report, Valladolid, España.

Galbe, M. and Zacchi, G. (2012). Pretreatment: The key to efficient utilization of lignocellulosic materials. *Biomass and Bioenergy*, 46, 70–78. doi: 10.1016/j.biombioe.2012.03.026.

Gomes-da Silva, Z.M., Gálvez-Cantero, L., Gómez-Julián, A.M., Julián-Ricardo, M.C., and Ramos-Sánchez, L.B. (2022). Análisis de alternativas tecnológicas de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña. *Centro Azúcar*, 49(2), 15–25.

González, A.P. (2018). *Desarrollo de pretratamientos enzimáticos de materiales lignocelulósicos para la obtención de bioetanol de segunda generación*. Ph.D. thesis, Universidad de Sevilla.

Jara Huacacolqui, E.L., Leiva Cabrera, F.A., Martin Alva, E.A., Medina Vásquez, K.M.E., Bardales Vásquez, C.B., and León Torres, C.A. (2022). Los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales de la libertad y la producción de biomasa de candida utilis var. major. *Arnaldoa*, 29(1), 163–176.

Moonsamy, T.A., Mandegari, M., Farzad, S., and Görgens, J.F. (2022). A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane. *Industrial Crops and Products*, 188, 115675. doi:10.1016/j.indcrop.2022.115675.

Nasution, M.H., Lelinasari, S., and Kelana, M.G.S. (2022). A review of sugarcane bagasse pretreatment for bioethanol production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 963(1), 012014. doi: 10.1088/1755-1315/963/1/012014.

Olmo, O.d., Casanova Cabeza, E., Galvez Taupier, L., Lodos Fernandez, J., Fernandez Rodriguez, N., and Abril Gonzalez, A. (2015). El bagazo de la caña de azúcar. propiedades, constitución y potencial. *Patrimonio Cientifico del nuevo ICIDCA. Habana: ICIDCA*.

Pantoja-Matta, A.J., Cuatin-Inguilán, M.F., and Muñoz-Muñoz, D. (2015). Efecto del pretratamiento químico y enzimático en la deslignificación de biomasa agroindustrial típica del cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(1), 45–53.

Pérez, O.F.A., Varela, K.A.D., and Mena, J.D.C. (2022). Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.

Portal, P., Gurdo, N., Novelli-Poisson, G., Bonelli, P., Cuikerman, A., and Galvagno, M. (2014). Producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales con levaduras resistentes a estreses obtenidas por ingeneria evolutiva. In *Tercer Saprobio de procesos biotecnológicos*. FABICIB, Argentina.

Precedence Research (2023). Ethanol market - global market size, share, trends analysis, segment forecasts, regional outlook 2023 - 2032. Technical Report 1188, Precedence Research Pvt. Ltd., Ottawa, Canada. URL `precedenceresearch.com/ethanol-market`.

Ramsey, S., Williams, B., Jarrell, P., and Hubbs, T. (2023). Global demand for fuel ethanol through 2030. Technical Report BIO-05, U.S. Departament of Agriculture, Economic Research Service.

Riaño, A.M.S. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 1(5). URL `revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/58`.

Rojas, OA Ávila, D.y.J.S. (2010). Análisis del ciclo de vida e integración del proceso de producción de bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de caña. *Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Colombia*.

Tantayotai, P., Gundupalli, M.P., Katam, K., Rattanaporn, K., Cheenkachorn, K., and Sriariyanun, M. (2022). In-depth investigation of the bioethanol and biogas production from organic and mineral acid pretreated sugarcane bagasse: Comparative and optimization studies. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 45, 102499. doi:10.1016/j.bcab.2022.102499.

Travaini, R., Barrado, E., and Bolado-Rodríguez, S. (2016). Effect of ozonolysis pretreatment parameters on the sugar release, ozone consumption and ethanol production from sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 214, 150–158. doi:10.1016/j.biortech.2016.04.102.

Valladares-Diestra, K., Vandenberghe, L., Zevallos Torres, L., Nishida, V., Zandona Filho, A., Woiciechowski, A., and Soccol, C. (2020). Imidazole green solvent pre-treatment as a strategy for second-generation bioethanol production from sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Journal*, 420. doi: 10.1016/j.cej.2020.127708.

Valles Sáez, A. (2022). *Estudio del proceso simultáneo de sacarificación y fermentación aceto-butílica-etílica a partir de paja de arroz*. Ph.D. thesis, universidad de valencia, Valencia, España.

ISSN: 2992-8338

Hydraulic Energy Harvesting Systems With Hydrokinetic Microturbines, an Alternative of Energy Generation for Electrification of Rural Houses.

Fher Said Macedo *, Ismael Hernández-Orozco *, Jaime Arau *, Manuel Rico-Secades**

**Tecnológico Nacional de México, CENIDET, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

(e-mail: {m22ce017, m22ce062, jaime.ar} @cenidet.tecnm.mx).

***Universidad de Oviedo, EPI Gijón, C.P. 33203, Gijón, Asturias, España.*
(e-mail: mrico@uniovi.es).

Abstract: In this paper, an alternative for electricity generation from the use of renewables energies is analyzed, using as generation element, vertical axis hydrokinetic microturbines. Also are discussed the generation capacity and versatility of applications that could be given to this type of systems, mainly to be able to electrify rural houses that are isolated from the electrical grid and have a river or irrigation canal near them. Its main advantages are presented, as well as the generation capacity of these turbines. The concept of extended power coefficient is introduced for its application in water channels. Also, the interesting challenges involved in the development of this type of systems are mentioned, as well as the work opportunities in the power electronics stage.

Keywords: Power coefficient, water flow, hydrokinetic hydraulic turbines, electrification of rural houses.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la búsqueda de alternativas para la generación de energía eléctrica, va en aumento, así mismo el aumento en los compromisos del gobierno del país, tanto de manera nacional e internacional y la búsqueda de estrategias para reducir los efectos contaminantes al obtener energía eléctrica a partir de los combustibles fósiles, deriva a múltiples esfuerzos en los diferentes ámbitos y campos del conocimiento, como son la ingeniería, la ciencia y la tecnología.

El desarrollo de este tipo de proyectos trae consigo amplias ventajas de diferentes tipos, como económicas, ambientales y sociales, de acuerdo con Ramos-Aguilar et al. (2023), la principal transición de las energías no renovables a energías renovables consiste principalmente en la disminución de gases de efecto invernadero.

Es importante mencionar que aún existen en el país algunos lugares, como casas rurales, que se encuentran aisladas de la red eléctrica, sin acceso a este importante servicio, lo que también deriva a la búsqueda de soluciones de esta problemática, para mejorar las condiciones de electrificación de este tipo de viviendas.

Como alternativa se ha encontrado adecuado el uso de sistemas con paneles fotovoltaicos, sistemas eólicos, o sistemas hidráulicos, entre otros; sin embargo, los primeros dos tienen limitantes ya que dependen de variables como la irradiancia solar, así como del viento, lo que causa cambios inesperados en la generación de energía; en cambio en el presente documento, se plantea la alternativa de obtención de energía a partir de las corrientes del agua con microturbinas hidrocinéticas, colocándolas en ríos de bajo cauce o canales de riego, para la electrificación de casas rurales aisladas de la red eléctrica, denotando su ventaja frente a otros sistemas de cosecha de energía, ya que no presenta cambios bruscos en la energía disponible (como es el caso del recurso solar y eólico). Por esta y otras razones, se ha encontrado viable de este tipo de elementos de generación de energía. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de estas microturbinas hidrocinéticas de eje vertical, en este caso tipo Gorlov.

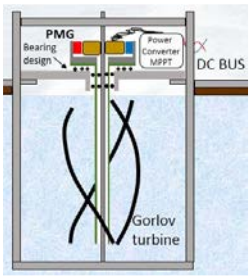


Fig. 1. Turbina hidrocinética de eje vertical tipo Gorlov.

Las microturbinas hidrocinéticas se han encontrado como alternativa para la generación de energía eléctrica, estas presentan ventaja frente las turbinas tradicionales o sistemas hidroeléctricos, los cuales cumplen con su función de ajustar las curvas de demanda, pero tienen la desventaja de ser costosos y con alto tiempo de construcción (por meses o años), así mismo de acuerdo con Álvarez et al. (2017), las microturbinas hidrocinéticas generan energía, sin presas ni otras estructuras, únicamente a partir de la energía cinética de las corrientes de agua, como caudales fluviales, corrientes de marea, flujos de canales, etcétera.

ISSN: 2992-8338

Para su funcionamiento estas turbinas requieren un flujo y una profundidad de agua mínimas. Esta energía es predecible, ya que el flujo de agua no fluctúa tan bruscamente de un momento a otro como lo hacen el viento o la irradiación solar Yuce et al. (2014).

2. MICROTURBINAS HIDROCINÉTICAS

Las turbinas hidrocinéticas, son dispositivos que se utilizan para obtener energía de corrientes fluyentes de agua en ríos, mares o canales hidráulicos. El aprovechamiento se realiza por medio de rotores cuyo diseño aprovecha el término cinético de la corriente (velocidad). El Departamento de Energía de los Estados Unidos (US Department of Energy) define a estos rotores como "turbinas de baja presión que aprovecha la corriente fluyente de un cauce con baja energía potencial", siendo la diferencia de cotas aguas arriba y abajo inferior a 0.2 metros, Khan et al. (2009).

Las turbinas pueden ser categorizadas dependiendo de la orientación del eje de rotación con respecto a la dirección del flujo del agua. Se distingue entre turbinas axiales, en las cuales su eje es paralelo a la corriente de agua, y turbinas de flujo cruzado, cuyo eje es perpendicular a la corriente Brun et al. (2013).

2.1 Tipologías de turbinas hidrocinéticas

En la actualidad, el aprovechamiento de las corrientes de flujo de agua se efectúa, principalmente, utilizando dos tipologías de turbinas hidrocinéticas: turbinas de eje horizontal (Horizontal Axis Water Turbines, HAWT) y turbinas de eje vertical (Vertical Axis Water Turbines, VAWT). Por un lado, en la tipología *HAWT*, los diseños son análogos a los molinos eólicos, buscándose maximizar el área barrida por sus palas para aumentar la extracción de energía. La Figura 2 muestra una imagen de una turbina *HAWT*.

Fig. 2. Ejemplo de turbina HAWT, Agudelo (2021).

Por otro lado, en la tipología VAWT se buscan hacer más eficientes las actividades de mantenimiento e instalación ya que, los componentes eléctricos y electrónicos se colocan fuera del agua.

Cabe mencionar que el presente documento se enfoca principalmente en las turbinas de este tipo, las cuales hasta ahora existen múltiples diseños en función de la estructura y diseño de sus álabes, como pueden ser las turbinas tipo Gorlov, Darrieus, entre otras.

La Figura 3 muestra un ejemplo de una turbina VAWT.

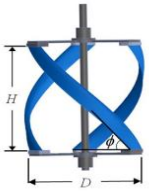


Fig. 3. Ejemplo de turbina VAWT, Talukdar (2017).

A su vez, las turbinas hidrocinéticas se dividen en dos grandes tipologías según su comportamiento hidrodinámico; turbinas de sustentación (lift) o de arrastre (drag)

En las primeras, la fuerza preponderante es la de empuje y tienen como principal ventaja su facilidad de arranque a bajas velocidades. Sin embargo, la velocidad en la punta del álabe raramente superará a la del fluido, por lo que tanto el rendimiento como la energía generada será muy reducida. Con el objetivo de aumentar su rendimiento, en los últimos tiempos se han realizado importantes avances en el desarrollo de diseños de turbinas por sustentación. En esta tipología de rotores, la fuerza preponderante es la sustentación, por lo que la velocidad en la punta del álabe es considerablemente mayor que la velocidad de la corriente. Estas turbinas alcanzan rendimientos superiores a las de arrastre, pero tienen problemas de arranque a velocidades bajas. En este sentido, cabe mencionar que para lograr la velocidad de arranque se han desarrollado sistemas híbridos compuestos por turbina de arrastre y de sustentación o sistemas electrónicos que permiten el arranque del generador como motor (B2B-back-to-back).

Otro aspecto clave en las turbinas por sustentación es el diseño del álabe, ya que aspectos como su geometría, solidez o el ángulo de álabes, son claves en el rendimiento final del rotor. Existen numerosas geometrías que han sido estudiadas tanto de forma experimental como numérica de modo que se conoce su comportamiento ante la incidencia de un flujo, como las series NACA (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA).

Cada turbina tendrá diferentes rendimientos de acuerdo a sus materiales, diseño y tamaño de construcción, por lo que resulta interesante poder seleccionar entre las múltiples posibilidades la que permita cumplir con la problemática a resolver, ya que como se menciona, dentro de sus ventajas podemos escoger alguna o construir alguna (de acuerdo a las necesidades del usuario) que permite colocarla en el espacio disponible (ríos o canales de riego, por ejemplo).

Considerando que en México existen varios distritos de riego, Palacios et al. (2017), donde existen ciertas estandarizaciones de los canales de riego que se utilizan en el cultivo del país, presenta una amplia ventaja para poder realizar estimaciones del recurso hídrico y de la potencia útil que podríamos obtener para la implementación de este tipo de sistemas de generación de energía, teniendo como meta poder electrificar casas rurales que se encuentren aisladas de la red y que tengan cerca de ellas ya sea un río o canal de riego.

ISSN: 2992-8338

3. FUNCIONAMIENTO Y POTENCIA EXTRAIBLE

Este tipo de turbinas, manejan algunos parámetros importantes a considerar para su diseño e implementación, así mismo se puede destacar que podrían ser colocadas tanto en ríos de bajo cauce, como de canales de agua. De esta forma, para poder determinar la potencia extraíble que tiene este tipo de turbinas, se realizan diferentes estudios con base en el espacio donde se coloca, ya que la potencia extraíble en los ríos es principalmente de la energía cinética del agua, aplicaría el principio de funcionamiento de las turbinas eólicas (campo abierto) donde el límite de Betz, tiene un papel importante, sin embargo, en canales de riego, esto cambia, ya que el límite no aplica, por ser un espacio semicerrado, por lo que el teorema de Bernoulli tiene más sentido de acuerdo a su teoría, ya que extraemos energía también de la altura del agua.

Para comprender mejor esto se muestra en la Figura 4 un diagrama que aborda la clasificación sobre el tipo de espacio donde se pueden colocar las turbinas y de donde se puede extraer potencia.

Fig. 4. Clasificación de la potencia extraíble a partir de espacio de instalación de las turbinas.

De esta forma, al entender la manera en que se puede extraer potencia según sea el espacio de colocación de la turbina, se destaca la forma analítica de comprensión de lo antes mencionado.

La eficiencia de estas turbinas, depende de algunos factores específicos, como sus dimensiones, materiales y tipo de turbina. La eficiencia de estas turbinas está dada por el coeficiente de potencia (Cp).

Tradicionalmente el coeficiente de potencia (Cp) representa la cantidad de potencia en tanto por unidad que se puede extraer respecto a la potencia cinética de fluido. Esta potencia cinética es de donde extraemos energía en aplicaciones donde no es posible extraerla de la potencia de presión ni de la potencia de altura (aplicaciones en campo abierto). Este es el concepto ampliamente extendido en la bibliografía y es aplicable a turbinas eólica y turbinas hidrocinéticas en campo abierto (p.e. el cauce de un río amplio) donde la energía disponible para extraer sería únicamente la energía cinética del fluido.

Por el contrario, en un canal de riego, y como consecuencia de las condiciones de bloqueo del fluido, podemos extraer energía tanto de la energía cinética de fluido como de la energía de altura del mismo. En estas aplicaciones, el coeficiente de potencia tradicional (Cp) no sería representativo. En este trabajo, nos atrevemos a introducir un coeficiente de potencia extendido (Cpx) que representaría el tanto por uno de la potencia que se puede extraer respecto a la potencia extraíble, que en el caso de un canal de riego sería potencia cinética más la potencia de altura.

Este nuevo coeficiente de potencia extendido (Cpx) se puede representar con la siguiente expresión:

$$Cpx = \frac{Pex}{Pt} \quad (1)$$

Donde Pex, es la potencia extraíble (en general) y Pt es la potencia teórica que se puede extraer el recurso hídrico.

Resulta evidente que, en campo abierto, el tradicional concepto de coeficiente de potencia y el extendido son idénticos (Cp=Cpx). Por el contrario, en un canal de riego, el tradicional concepto de coeficiente de potencia no tendría utilidad ni uso.

La potencia teórica (Pt) en ríos (campo abierto), se puede representar con la siguiente ecuación:

$$Pt = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Ae \cdot v^3 \quad (2)$$

Y de forma análoga, la potencia teórica (Pt) en un canal de riego:

$$Pt = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Ae \cdot v^3 \ + \rho \cdot g \cdot he \cdot Ae \cdot Ve \quad (3)$$

La potencia extraíble del recurso hídrico disponible por una turbina hidrocinética depende de su eficiencia, dimensiones, así como de la velocidad y densidad del fluido, este es el resultado de despejar la ecuación correspondiente para obtener la potencia pudiendo calcularse según la siguiente ecuación:

$$Pex = Cpx \cdot Pt \quad (4)$$

Donde Pex (W) es la potencia extraíble (potencia útil) obtenida en el eje de la turbina, Cpx (p.u.) es el coeficiente de potencia que representa su eficiencia, ρ (kg/m3) es la densidad del fluido, Ae (m^2) es el área del canal o de la turbina es cada caso, he (m) es la altura de fluido en el canal y V(m/s) es la velocidad del fluido antes de la turbina (o turbinas) y Ve (m/s), la velocidad a la entrada. En los análisis realizados se ha considerado que la densidad del agua dulce es de 997 kg/m3.

Por otra parte, y en relación con la ecuación 3, es importante enfatizar que en un canal de riego la potencia cinética es muy pequeña y por el contrario la potencia de altura es mucho mayor, con lo que se podría afirmar que en un canal de riego estamos extrayendo energía de la energía de altura del fluido principalmente, esto se puede observar en la Figura 7.

Normalmente la velocidad de rotación de la turbina se suele presentar normalizada a la velocidad del fluido, utilizando el TSR (*Tip Speed Ratio*), el cual está dado por la expresión siguiente:

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (4)$$

Donde ω es la velocidad angular, R es el radio de la turbina y v, es la velocidad del fluido. Esta variable representa la velocidad del extremo del álabe respecto a la velocidad del fluido. Por ejemplo, un TSR=1 significa que el extremo del álabe se mueve a la misma velocidad que el agua.

ISSN: 2992-8338

En la Figura 5, se muestra, un esquema de Cpx respecto al TSR, que representa punto máximo de potencia (Maximun Power Point, MPP), que, de acuerdo al diseño de cada turbina y de la aplicación, este será diferente. La Figura 5 muestra los puntos más significativos (turbina parada y operando en vacío), así como el punto de máxima potencia (MPP) objetivo de la etapa de electrónica de potencia.

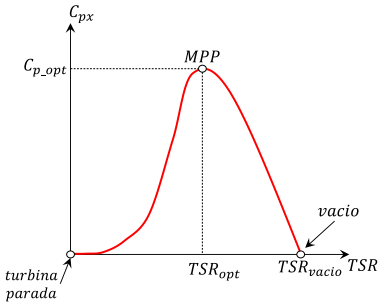


Fig. 5. Coeficiente de potencia extendido (Cpx).

La Figura 6, muestra la potencia teórica (Pt) y la extraíble (Pex) en el límite de Betz, para el caso de una turbina en campo abierto. Se observa claramente, que la potencia disponible es únicamente la cinética. Cabe mencionar que en una turbina real los coeficientes de potencia serían mucho menores (p.e. Cpx=0.35).

La Figura 7, muestra la potencia teórica (Pt) y la extraíble (Pex) para un canal de riego de unas determinadas dimensiones (ver Tabla 1). Se observa que la potencia disponible es suma de la cinética y de la de altura, pudiendo afirmarse, que la cinética es prácticamente despreciable. La Figura 7, muestra también la máxima potencia extraíble (Pex) obtenida analíticamente. El cálculo de esta potencia máxima no ha sido incluido en este documento y puede encontrarse en los resultados de investigación de tesis de maestría de Macedo-García (2023). Es importante destacar del análisis realizado, que al extraer energía del fluido (con una o varias turbinas) la potencia cinética del fluido aumenta y la potencia de altura disminuye, con lo cual puede afirmarse que se ha extraído la energía principalmente de la altura del fluido.

Es decir, la caracterización de turbinas en canales de agua, depende de varios factores, ya que como se mostró en la Figura 4, al tratarse de un espacio semicerrado, se extrae energía principalmente de la altura del canal de riego, ya que depende de las dimensiones del canal (base y altura), así como de la altura del recurso hídrico disponible. En la teoría, al colocar una turbina en un espacio de este tipo, el Cpx, ya no se rige por el conocido límite de Betz, por lo que si utilizaramos este tradicional concepto de coeficiente de potencia (Cp) en lugar del extendido (Cpx) podría darse la paradoja de encontrarnos con valores de Cp superiores a la unidad, como menciona Espina-Valdés et al. (2022), y ello es debido a que la energía extraída supera ampliamente la energía cinética del fluido, mucho menor que la de altura como puede validarse.

En la Tabla 1, podemos observar datos de entrada propuestos para comparar la potencia que podemos llegar a extraer con este tipo de turbinas en los dos espacios de instalación mencionados. Al utilizar las ecuaciones 1 a 4, y utilizando Python para la solución de las variables mencionadas y obtención de gráficos, podemos comprobar de forma gráfica esta potencia útil.

Tabla 1. Datos de entrada propuestos

Variable	Río de Bajo Cauce	Canal de Agua
Radio turbina	0.20m	0.20m
Altura turbina	0.40m	0.40m
Base canal	N/A	0.40m
Altura canal	N/A	0.60m
Altura agua	N/A	0.50m

A partir de los datos de la Tabla 1, en la Figura 6, podemos observar la potencia útil que podemos llegar a obtener en función de la velocidad de flujo del recurso hídrico, que va de 0 hasta 2 m/s (río de bajo cauce), mientras que en la Figura 7, podemos observar la potencia útil extraíble con una velocidad de flujo de 0 a 1 m/s (canal de agua).

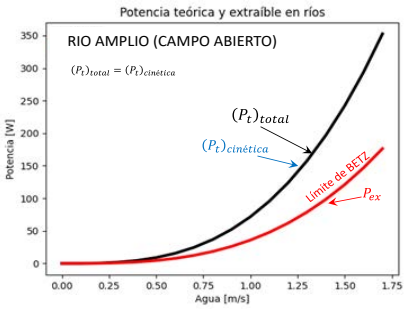


Fig. 6. Potencia teórica y extraíble (cauce de río).

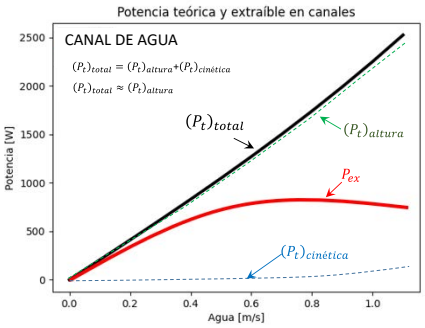


Fig. 7. Potencia teórica y extraíble (canal de agua).

En la Figura 6, se observa que a una velocidad de 1.75 m/s, podríamos llegar a obtener alrededor de 175W, por otro lado, en la Figura 7, se aprecia que en un canal de agua es mayor la capacidad de generación (resultado del análisis en un espacio semicerrado), ya que considerando que un canal de agua es menor la velocidad de flujo, es aún mayor la potencia extraíble. Por ejemplo, a una velocidad de 0.4 m/s, podríamos extraer alrededor de 750W.

Es importante e interesante mencionar que, en los canales de agua, la potencia extraíble no es directamente proporcional a

ISSN: 2992-8338

la velocidad del fluido, ya que como se ve en la Figura 7, esta tiende a llegar a una velocidad límite donde ya no puede extraer más potencia del recurso hídrico, es decir, existe un límite de acuerdo a cada he y Ve del canal, lo que deriva a cuestionamientos interesantes al momento del desarrollo de este tipo de sistemas. Así mismo faltaría considerar algunas de las pérdidas de carga (o pérdidas de bloqueo por el hecho de colocar la turbina en determinado espacio), y así poder determinar la potencia eléctrica que logramos extraer.

Ante este análisis, podemos decir que se podrían colocar turbinas en paralelo y de esta forma aumentar la potencia útil para electrificar casas rurales aisladas que tengan cercano a ellas un río o canal de riego, así mismo existe la posibilidad de hacer sistemas híbridos (solar – hidráulico, por ejemplo), utilizando algunas otras energías renovables.

4. SISTEMAS DE COSECHA DE ENERGÍA HIDRÁULICA CON TURBINAS

Mostradas las ventajas de este tipo de elementos de generación de energía (turbinas) a partir del recurso hídrico, así como tipologías y teoría de funcionamiento de las mismas, en la Figura 8 se muestra un diagrama esquemático de este tipo de sistemas donde la electrónica de potencia tiene un papel fundamental, para que este conjunto de elementos permita la obtención de energía eléctrica, y así darle alguna aplicación, como la electrificación de casas rurales aisladas, por ejemplo.

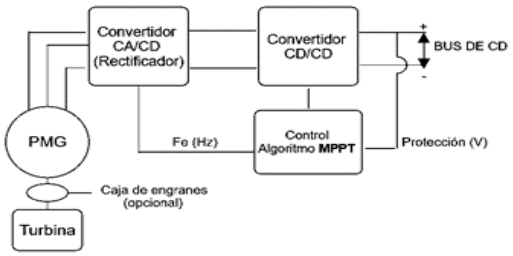


Fig. 8. Diagrama del sistema de cosecha de energía.

En este diagrama tenemos que, después del acoplamiento de la turbina seleccionada y el generador de imanes permanentes, se tiene que rectificar la corriente alterna trifásica (conversión CA/CD), para posteriormente analizar la topología de potencia a utilizar en el convertidor CD/CD y regulación de la corriente del mismo y este controlado con la implementación de un algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia disponible.

Este tipo de sistemas, permiten el desarrollo de alternativas para electrificación de casas rurales, por ejemplo, se podría seleccionar un perfil de consumo de una casa rural promedio (elementos de primera necesidad), y de este modo poder caracterizar el diseño del sistema de acuerdo a la potencia y consumo de la vivienda, ya que como vimos anteriormente, la potencia extraíble de las turbinas es tal que podríamos utilizarlas para ese fin (ya sea colocada en ríos o canales de riego) y de esta forma crear nuevas posibilidades de obtención de electricidad para las casas rurales que no tienen este importante servicio de primera necesidad para las actividades de la vida cotidiana.

Se puede observar que el conjunto de turbina y generador (Permanent Magnet Generator, *PMG*), junto con la electrónica de potencia asociada, permite encontrar alternativas de diseño de este tipo de sistemas, entregando un bus de corriente directa, así mismo se puede observar que la caja de engranes es opcional, ya que, realizando un análisis de la potencia extraíble, podríamos prescindir de utilizarla y así, hacer más económico el desarrollo de este tipo de sistemas.

A partir del bus de CD se puede optar (además de poder alimentar cargas en CD o en CA con la colocación de un inversor) por ofrecer una autonomía adicional ante interrupción temporal del flujo de agua o reducción del tamaño de las turbinas hidrocinéticas, incorporando baterías al sistema. De acuerdo con los estudios en la literatura existente de este tipo de sistemas, primero es imprescindible el análisis de la parte mecánica (mecánica de fluidos) Contreras et al. (2018), para poder determinar la eficiencia de las turbinas mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), donde entraría el análisis de la estructura y propiedad de los materiales de fabricación, diseño y dimensiones, Gharib et al. (2021), donde existen amplios esfuerzos por diversos autores.

Así mismo esto deriva a un amplio conjunto de trabajos de investigación en distintas áreas, como la ingeniería mecánica, así como el área de electrónica de potencia, ya que se tendrían hacer un análisis de la topología de potencia a utilizar del convertidor CD/CD (considerando que es un sistema aislado de la red), donde también se tendría que valorar si se usan protecciones y/o aislamiento galvánico, el grado de autonomía del sistema, así como la técnica más adecuada para el algoritmo *MPPT* (Maximun Power Point Tracker) Álvarez et al. (2017).

Ante este conjunto de necesidades de diseño para el desarrollo de este tipo de sistemas, sería interesante contar con una metodología que permita la caracterización y diseño de todos los elementos del sistema, ya que existen en la literatura algunas metodologías de diseño como la de Romero-Menco et al. (2022). Esta se basa principalmente en el diseño de turbinas tipo propela, sin embargo, se enfoca más en la etapa de diseño mecánico y dinámica de fluidos computacional, no aborda elementos del sistema electrónico de potencia, lo que sería útil para poder desarrollar este tipo de sistemas de acuerdo a ciertos perfiles de consumo.

También resulta interesante analizar en qué software de diseño electrónico se podría validar el diseño de este tipo de sistemas, ya que, al contar con elementos mecánicos y eléctricos, resultaría interesante la manera de simularlos en conjunto.

5. CONCLUSIONES

Ante la preocupación del uso de las energías renovables como alternativa para generación de energía, así como del interés de buscar energías limpias no intermitentes, se ha encontrado como opción viable el uso de microturbinas hidrocinéticas para el desarrollo de sistemas de cosecha de energía hidráulica, colocándolas en ríos o canales de agua (canales de riego).

Este artículo presenta la teoría de turbinas hidrocinéticas de eje vertical, desde tipologías, funcionamiento y potencia que

ISSN: 2992-8338

pueden extraer en diferentes espacios de instalación (campo abierto y canales de agua), así como se logró mostrar la ventaja de estas al utilizarse en un sistema de cosecha de energía mediante la electrónica de potencia asociada, y se introduce el concepto de coeficiente de potencia extendido (Cpx) para su aplicación en canales de agua que es muy útil al momento de diseñar este tipo de sistemas.

Se mostró que este tipo de sistemas, al contar con una mayor capacidad de generación (sin perturbaciones o cambios bruscos), a diferencia de otros sistemas de cosecha de energía, permite también optimizar los diseños del *MPPT*, donde podrían encontrarse algunas alternativas muy interesantes y discutir las opciones más viables realizando un estudio comparativo.

Resultaría de alto interés el desarrollo de una metodología de diseño de este tipo de sistemas, que sirva como guía de diseño para el desarrollo de este tipo de proyectos, donde aborde los criterios para la selección de cada uno de los elementos, ya que como se mencionó, no existe en la literatura algo así, solo trabajos similares respecto al diseño mecánico o la mecánica de fluidos computacional, pero no en el campo de la ingeniería electrónica.

De esta manera se ha presentado una alternativa de generación de energía para electrificación de casas rurales aisladas de la red eléctrica, que cuenten con un río de bajo cauce o canales de riego cerca de ellas. Todo esto deriva a muy interesantes proyectos de investigación y desarrollo tecnológico, ante las nuevas tendencias en el país y de forma global ante el uso de energías limpias.

REFERENCIAS

Agudelo, S. H. (2021). Modelado numérico de una turbina para la extracción de energía por medio de corrientes marinas. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), CDMX, México.

Álvarez-Álvarez, E., Rico-Secades, M., Corominas, E.L., Huerta-Medina, N., Soler-Guitarta, J. (2018). Design and control strategies for a modular hydroKinetic smart grid. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,95,137–145.

Betz, A. (1920). Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren. Zeitschrift für das gesamteTurbinenwes. 26, 307-309.

Brun, P., Terme, L., Barillier, A. (2013). Paimpol-Bréhat: Development of the First Tidal Array in France. In: Marine Renewable.

Contreras, L.T., López, O.D., Lain, S. (2018). Computational Fluid Dynamics Modelling and Simulation of an Inclined Horizontal Axis Hydrokinetic Turbine. Energies. 11,3151.

Espina-Valdés, R., Fernández-Jiménez, A., Fernández-Pacheco, V. M., Gharib-Yosry, A., Álvarez-Álvarez E. (2022). Análisis experimental de la influencia del ángulo de torsión de los álabes de turbinas hidrocinéticas Darrieus helicoidales, Ingeniería del Agua, vol. 26, núm. 3, pp. 205–216.

Gharib, A., Fernández-Jiménez, A., Álvarez-Álvarez, E., Marigorta, E.B. (2021). Design and characterization of a verticalaxis micro tidal turbine for low velocity scenarios. Energy Conversion Management, 237,114144.

Goundar, J.N., Ahmed, M.R. (2014). Marine current energy resource assessment and design of a marine current turbine for Fiji.Renewable Energy, 65, 14-22.

Guney, M., Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 14, pp 2996-3004.

Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., & Quaicoe, J. E. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. Applied energy, 86(10), 1823-1835.

Kinsey, T., Dumas, G. (2017). Impact of channel blockage on the performance of axial and cross-flow hydrokinetic turbines. Renewable Energy, 103, 239–254.

Macedo-García, F. S. (2023). Metodología de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas hidrocinéticas. Resultados de Investigación de Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México.

Meana-Fernández, A. (2017). Selección de perfil hidrodinámico para la construcción de un modelo a escala de una microturbina hidrocinética, V Jornadas de Ingeniería del Agua, n.º 1, pp. 1–4.

Palacios, A., Peña N., Cervantes E., Güitrón A., López M. (2017). Bases para un Centro Mexicano en Innovación de Energía Hidroeléctrica CEMIE-Hidro, Palacios Fonseca, Jiutepec, Morelos, México, Informe del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA,

Patel, V., Eldho, T.I, Prabhu, S. V. (2019). Velocity and performance correction methodology for hydrokinetic turbines experimented with different geometry of the channel. Renewable Energy, 131, 1300–1317.

Romero-Menco, F., Rubio-Clemente A., Chica E. (2022) Turbinas hidrocinéticas tipo propela: una alternativa para la generación de energía eléctrica, Revista UIS Ingenierías, vol. 21, núm. 3.

Talukdar, P. (2017). IN-SITU Experiments to estimate the performance characteristics of a double-step helical-bladed hydrokinetic turbine. Gas Turbine India Conference. GTINDIA2017-4572.

Yuce MI, Muratoglu A. (2015). Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review. Renew Sustain Energy Rev, 43, 72–82.

ISSN: 2992-8338

Overview reconfiguration strategies on multilevel converters

Luis Gerardo Pérez Juárez*, Rodolfo Amalio Vargas Méndez*, Abraham Claudio Sánchez *, Juan Ángel González Flores*, Ma. Del Carmen Toledo Pérez*, Adan Bravo Torres*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ingeniería Electrónica, CP 62490 Cuernavaca, Morelos (e-mail: m22ce020@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: In this paper, a state-of-the-art review of some techniques used in multilevel converters to exit the fault mode has been carried out. In this review, the terms fault tolerant, the diagnostic part and the reconfiguration part are addressed. Taking into account that in order to move to reconfiguration, we first have the fault diagnosis. The reconfiguration stage is in charge of correcting the fault. In this work, an investigation of the different reconfiguration strategies was carried out, focusing specifically on analytical redundancy and material redundancy. The main idea of the fault-tolerant system is that the system does not stop and continues to operate under degraded conditions, while a prompt reconfiguration is carried out.

Keywords: Fault diagnosis, fault reconfiguration, multilevel converters, fault detection, physical redundancy, analytical redundancy.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los convertidores electrónicos de potencia se utilizan cada vez más para distintas aplicaciones, son empleados en nuestra vida cotidiana para realizar distintas actividades, se emplean en sistemas de suministro de energía eléctrica debido a la adopción acelerada de fuentes de energía renovable.

Los convertidores basan su funcionamiento en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia (MOSFETs. IGBTs, etc.), de esta manera sus terminales son polarizadas y permiten el flujo de corriente a través de su rama y alimente a la carga (Oh et al., 2015).

1.1 Convertidores multinivel (CML)

Los convertidores multinivel son una tecnología interesante para aplicaciones de alta potencia (0,4 MW – 40 MW) y media/alta tensión (2,3 Kv – 13,8 kV). Una característica de los convertidores multinivel es que pueden conformarse por submódulos (SM) idénticos, cada submódulo está compuesto por una serie de IGBTs.

Los convertidores multinivel cuentan con ventajas particulares de operación gracias a que pueden incrementar los niveles de tensión a la salida, enseguida se muestran las ventajas que ofrecen (N. K. Kumar et al., 2019):

1) Reducción del contenido armónico
2) Minimización de pérdidas eléctricas
3) Reducción de pérdidas por conmutación
4) Aplicación en alta tensión

Dentro de los CML se utilizan técnicas especiales de modulación y de control para distribuir la tensión total entre los semiconductores. Por la forma en que la tensión se controla dentro de la estructura, es muy fácil crear un convertidor de alta potencia y alta tensión con una estructura de varios niveles. En la literatura se encuentran establecidas diversas clasificaciones de los CML, sin embargo, la mayoría de autores los clasifican en tres (Araque G et al., 2012),(Desai & Shah, 2013).

1) Diodos de enclavamiento
2) Condensadores flotantes
3) Puentes H conectados en cascada

En la Fig.1 a se muestra la topología del CML con diodos de enclavamiento, esta topología fue la primera que se desarrolló para la conversión de energía CD/CA. Una de sus desventajas es que necesita mayor cantidad de diodos para obtener más niveles de tensión (Koshti & Rao, 2017).

ISSN: 2992-8338

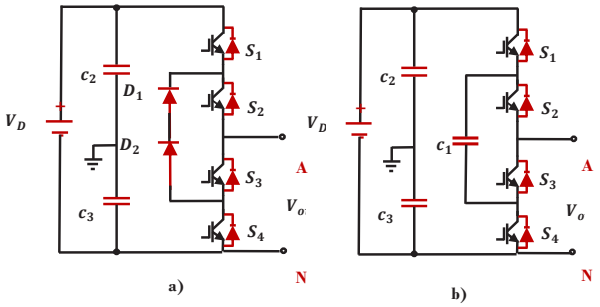


Fig.1. A) Diodos de enclavamiento, B) Condensadores flotantes.

Los CML con condensadores flotantes, como se muestra en la Fig. 1 b, tienen una topología similar a la de diodos de enclavamiento, a diferencia que en lugar de diodos se conectan condensadores para generar un mayor número de niveles. Al aumentar el número de condensadores se vuelve más complicado el control del convertidor (Koshti & Rao, 2017).

La Fig. 2 muestra un puente H, la topología del CML en cascada consiste en conectar puentes H en serie para obtener una onda senoidal a la salida del convertidor, la cual se forma al sintetizar la tensión de CA a partir de varias fuentes de alimentación independientes de CD.

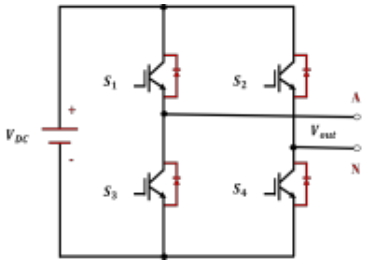


Fig. 2. Puente H.

2. SISTEMA TOLERANTE A FALLAS

Los convertidores multinivel presentan grandes ventajas en comparación con un convertidor convencional, sin embargo, no están exentos de presentar fallas en su operación. Para ello, es importante implementar un sistema tolerante a fallas, el cual permita que el sistema se mantenga operando con la presencia de alguna (Chen et al., 2005). El sistema tolerante a fallas se compone de dos etapas, como se muestra en la Fig. 3, diagnóstico de fallas y reconfiguración.

Los sistemas de control tolerante a fallas (FTCS, por sus siglas en inglés), modifica el sistema de control y activan o desactivan componentes o subsistemas para mantener un funcionamiento aceptable en caso de falla (Guo, Wang, Liang, Pang, & Goncalves, 2018).

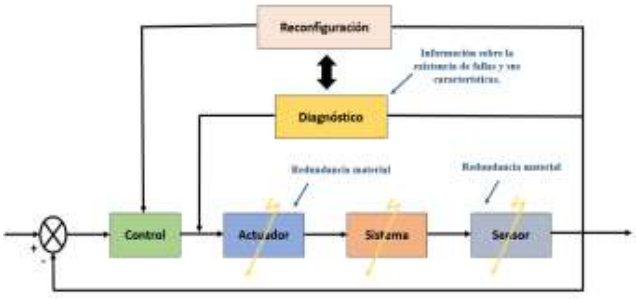


Fig. 3. Esquema general del FTCS.

Las funciones del FTCS incluyen la detección de fallas (FD, por sus siglas en inglés), la localización e identificación del tipo de falla y el restablecimiento de la operación normal. Sin embargo, para utilizar la técnica de reconfiguración, antes se debe emplear un sistema de monitoreo que detecta, aísla y brinda información sobre la existencia de fallas y sus características (Patel et al., 2019).

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

De acuerdo con la terminología de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC-por sus siglas en inglés), el término "diagnóstico de fallas" se refiere a la determinación de la presencia de fallas en el sistema. Además, localiza el instante en que aparecen. Después de la etapa de detección se procede al aislamiento de la falla, que se encarga de señalarla e identificarla en lugar de eliminarla (Araujo Ribeiro et al., 2004).

En la Fig. 4 se muestra la forma de onda de tensión a la salida de un convertidor multinivel en cascada de 7 niveles que se encuentra operando en condiciones nominales libre de fallas.

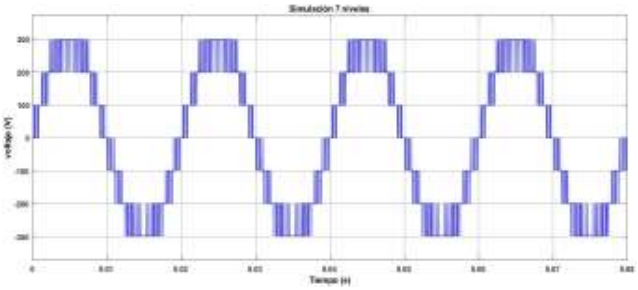


Fig. 4. Salida de tensión del convertidor sin falla.

En la Fig. 5 se muestra la forma de onda de tensión a la salida, con la presencia de una falla de circuito abierto que se localiza en la primera rama de la celda uno. La falla se puede apreciar en la degradación de uno de los niveles de tensión a la salida. Sin embargo, el sistema se mantuvo operando y la degradación se vio afectada en los niveles de tensión.

ISSN: 2992-8338

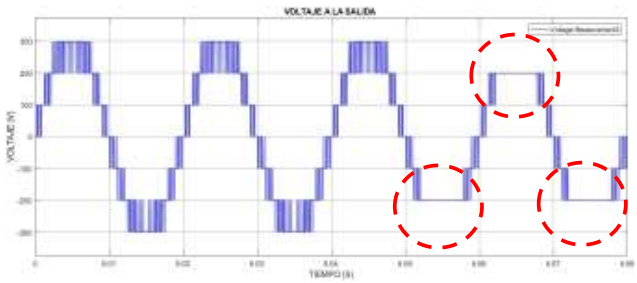


Fig. 5. Salida de tensión de convertidor con falla.

3.1 Fallas de circuito abierto y cortocircuito

Las fallas de cortocircuito y de circuito abierto son los dos tipos principales de fallas en los IGBTs (Zhou et al., 2019), estos cuentan con protecciones contra cortocircuitos que les permiten desconectarse inmediatamente cuando se detecta este tipo de falla.

3.1.1 Fallas de conmutación de cortocircuito

Esta falla se origina cuando se activan al mismo tiempo dos IGBTs en la misma rama. Existen diversas causas que la originan, enseguida se muestran las más comunes:

- Encendidos parásitos.
- Mal funcionamiento del controlador de puerta.
- Sobre corriente y sobrecalentamiento.

3.1.2 Fallas de conmutación de circuito abierto

Este tipo de fallas se origina cuando el IGBT no cierra para permitir el flujo de corriente, aun cuando recibe la señal de disparo. Estas fallas son causadas por distintos motivos, enseguida se muestran los principales:

- Degradaciones en la soldadura debido a la tensión térmica – mecánica o a las variaciones de temperatura.
- Mal funcionamiento del controlador de puerta.

El método de detección de fallas es importante teniendo como objetivo el determinar el estado de los módulos de IGBTs.

4.- RECONFIGURACIÓN DE FALLAS

Una vez que el FD realice su trabajo determinado para encontrar las características de la falla, enviara esos datos al sistema de reconfiguración de fallas, dicho mecanismo puede llevarse a cabo mediante redundancia analítica o redundancia material. En la segunda implica el disponer de elementos extras para poder sustituir a los componentes dañados, el uso de esta estrategia permite a los sistemas aislar las fallas presentadas y que continúen operando en condiciones degradadas aceptables.

Cuando se utiliza la reposición del elemento dañado bajo el enfoque de redundancia material la operación del proceso después de la falla no es degradada, comparando con la redundancia analítica en este proceso existe una cierta degradación del sistema posterior a la falla, además de que el sistema de reconfiguración es diseñado con base en la técnica de modulación seleccionada.

En la literatura se reportan trabajos en los cuales se aplica reconfiguración mediante redundancia analítica y material, cada una de ellas es empleada en diversos escenarios. En la Tabla 1 se muestra una clasificación de diferentes trabajos en CML que utilizan alguna de estas técnicas de reconfiguración.

Tabla 1. Estrategias de reconfiguración

Referencia	Topología	Falla considerada	Niveles	Estrategia
(D. Kumar et al., 2022)	Condensa-dores flotantes	Circuito abierto	9	Redundancia analítica
(Chappa et al., 2021)	Condensa-dores flotantes	Circuito abierto	9	Redundancia analítica y material
(Reddy et al., 2018)	Cascada puente H	Circuito abierto	7	Redundancia analítica y material
(Mhiesan et al., 2020)	Cascada puente H	Circuito abierto y cortocircuito	7	Redundancia analítica y material
(Kim et al., 2016)	Cascada puente H	Circuito abierto	7	Redundancia analítica

4.1 Redundancia analítica

La redundancia analítica consiste en determinar una variable en donde se utiliza un modelo matemático del sistema, que implica las señales de entrada y de salida (Verde et al., 2013). El hecho de sobredimensionar el sistema resulta altamente costoso, por lo cual, se han buscado alternativas basadas en algoritmos que permitan diagnosticar el estado de los componentes.

En el trabajo de (Li et al., 2016) se utiliza un método de detección de fallas mediante un banco de observadores, es importante tener localizada la falla para poder pasar a la etapa de reconfiguración. Se realiza la reconfiguración aumentando el número de SM puenteados en la rama correspondiente y los SM restantes se modifican para proporcionar una tensión en la rama constante.

ISSN: 2992-8338

El autor (Fard et al., 2020) utiliza sistemas tolerantes a fallas con estados de conmutación redundantes para diferentes aplicaciones, este artículo se centra en el potencial de los convertidores multinivel. Se examinarón dos topologias, convertidores en cascada y condensadores flotantes. Además, se realizó reconfiguración mediante redundancia analítica, en la cual se basa el trabajo en dos tipos de modulación, PDPWM (Phase Disposition Pulse Width Modulation) y PSPWM (Phase Shifted Pulse Width Modulation).

En este trabajo (Choi et al., 2016) se utilizó reconfiguración analítica partiendo de un PODPWM (Phase Opposition Disposition Pulse Width Modulation) teniendo una transición fluida para el SM de redundancia desde el estado de espera hasta la operación de inicio. El SM se activa si la tensión de referencia es mayor que la portadora, y se desactiva si la tensión de referencia es menor. Para poner en funcionamiento los SM de redundancia, se requiere una rotación de n portadoras.

4.2. Redundancia material

Consiste en duplicar o triplicar elementos (sensores, actuadores) o incluso algunas etapas del proceso, a partir de esta información es más sencillo diferenciar entre las condiciones reales de operación (Verde et al., 2013). Existen diferentes métodos para llevar a cabo la redundancia material que son confiables y permiten una restauración rápida de las posibles fallas que se presenten. Sin embargo, el hecho de utilizar elementos de manera repetida tiene como consecuencia el aumento de costos, de tamaño y peso de los dispositivos.

En (Zhang et al., 2018) utilizan un sistema de diagnóstico basado en la metodología impulsada por datos para el convertidor de siete niveles en cascada, cuando existe una falla la señal de tensión es inyectada al sistema de detección. Las señales son procesadas y después se activa el control tolerante, se logra aislar la rama con falla y las señales de accionamiento de la rama defectuosa también se puentean y se reconfiguran.

El autor utiliza un MMC (Modular Multilevel Converter, por sus siglas en inglés) el cual presenta fallas dentro de sus SM, el funcionamiento tolerante a fallas requiere que, en caso de una falla, el convertidor continúe su funcionamiento sin alterar su funcionamiento nominal. Para ello se integran submódulos redundantes en las ramas del MMC. Basado en las tensiones de los condensadores de los submódulos se mantienen en un vector que se actualiza en función de la corriente de la rama y de la señal del vector de conmutación (Ahmed et al., 2015).

En ocasiones, es necesario reducir la potencia de un convertidor debido a una falla en el interruptor de potencia, de tal manera que las unidades restantes siguen suministrando la potencia a la carga. De esta forma, en (Ou et al., 2020) se realiza una conexión en paralelo de las unidades redundantes.

Se menciona en (Guo, Wang, Liang, Pang, & Gonçalves, 2018) y en (Konstantinou et al., 2013) que, en caso de una falla de un SM, los restantes no pueden generar la tensión necesaria, para ello se inserta el SM redundante. El SM con falla se puentea mediante un interruptor de alta velocidad y simultáneamente debe insertarse un SM redundante.

Se presenta una estrategia práctica que utiliza redundancia en el SM del MMC para su tolerancia a fallas. El autor (Kang et al., 2019) menciona que dicha estrategia proporciona un marco sistemático para equilibrar la compensación entre dos métodos convencionales para usar la redundancia activa y por lo tanto, logra flexibilidad operativa.

En el sistema tolerante a fallas del convertidor propuesto en (Wang et al., 2018) el componente dañado se puede reemplazar una vez que el control está en lazo abierto. Para lograr esto, se debe agregar una etapa de decisión. Esta etapa permite la protección del IGBT, se genera un retardo estimado para el tiempo de aislamiento eléctrico y finalmente la activación del reemplazo del elemento dañado al activar el interruptor bidireccional y enviar pulsos de puerta al dispositivo de reemplazo.

El control realizado en este trabajo (Hekmati et al., 2021) tiene un enfoque de lazo abierto utilizando la estimación de la energía almacenada y así proporcionar un rendimiento dinámico rápido para la etapa de la reconfiguración, consideran dos SM adicionales en cada rama del CML.

Los SM redundantes se pueden organizar en modo de reserva en frío para reducir las pérdidas de conducción, cuando se presentan fallas, el SM defectuoso debe puentearse inmediatamente cerrando el contactor de vacío y, simultáneamente, debe insertarse un SM redundante abriendo su contactor (Li et al., 2015).

Se emplea un convertidor multinivel en cascada de siete niveles con una estructura tolerante a fallas, empleando dos relevadores para eliminar las secciones defectuosas del convertidor, cuando los dos relevadores funcionan, todas las fuentes se conectan entre sí y forman un conjunto de fuentes de CD conectadas en serie, garantizando el valor fundamental de la tensión de salida (Jahan et al., 2018).

La estrategia presentada incluye un control predictivo y un PWM controlado por la tensión que determina los estados de conmutación apropiados para el funcionamiento continuo del accionamiento después de una falla. La topología hace posible integrar el hardware redundante y la capacidad de tolerancia total (Farhadi et al., 2018).

En (Chatzakis & Antonidakis, 2008) utilizan redundancia material al conectar una rama auxiliar en paralelo con el convertidor, cuando se presenta la falla de cortocircuito en algún interruptor automáticamente se activa esta rama extra y reemplaza a la rama dañada.

Con la ayuda de hardware adicional es posible medir y/o extraer variables de decisión que describen síntomas de falla. Las mediciones se comparan con umbrales predeterminados,

ISSN: 2992-8338

valores de referencia o límites, y/u otras mediciones de la misma cantidad registradas por otros sensores para obtener residuales que permitan detectar y/o localizar la falla (Li et al., 2018)

5. - REEMPLAZANDO EL COMPONENTE DAÑADO.

En el sistema, el componente dañado se puede reemplazar una vez que el control se realice en lazo abierto. Para lograr esto, se debe agregar una etapa de decisión. Esta etapa permite la protección del IGBT complementario correspondiente al IGBT dañado de la señal de detección, la generación de un retardo estimado para el tiempo de aislamiento eléctrico y finalmente la activación del reemplazo del elemento.

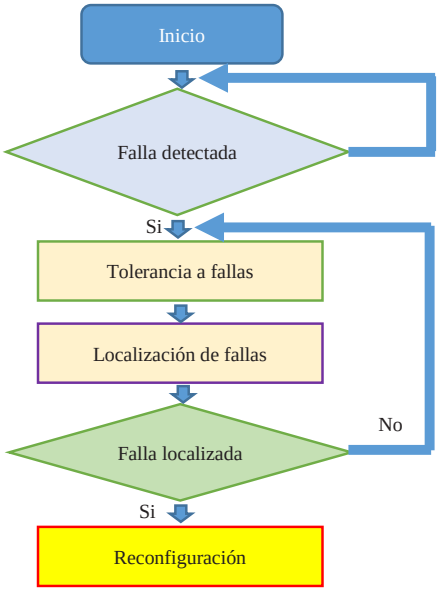


Fig. 6. Diagrama de flujo para la reconfiguración de fallas.

Para llegar a este paso es necesario tener anticipado un sistema de diagnóstico y un control tolerante como se muestra en la Fig. 6. En la etapa de detección se emplean algunas metodologías como son observadores, espacio de paridad y estimación paramétrica. En la siguiente etapa se emplea la tolerancia a fallas para garantizar un proceso transitorio suave, esto implica que el sistema pueda trabajar de manera degradada aceptable. Al comparar las tensiones de salida en el convertidor se puede localizar la falla y determinar en qué IGBT se localiza la falla. La siguiente etapa de reconfiguración es la más importante debido a que es donde se realiza el cambio de la rama o de IGBT dañado.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica para analizar diferentes metodologías que diversos autores emplean en la etapa de reconfiguración dentro del sistema tolerante a fallas. Se destacan algunas técnicas que incorporan SM o IGBTs adicionales en los puentes H para usarlos en caso de que alguna de las que están en función falle.

Además, es importante resaltar que, para llegar a la etapa de reconfiguración material, debe realizarse una etapa de diagnóstico de fallas que detecte, localice y que finalmente brinda las características de la falla (tiempo de aparición, tamaño de la falla, elemento dañado). Posterior a ello, se realiza redundancia analítica para evitar el paro total del sistema, esto al ocurrir una falla. Finalmente, los trabajos de los autores recaen en la redundancia material, sin detener al sistema y sin afectar el desarrollo. Los métodos basados en hardware pueden detectar y localizar celdas defectuosas agregando hardware o sensores adicionales que se utilizan únicamente para la detección de fallas. Teniendo claro que agregar redundancia aumenta el costo y la complejidad del diseño de un sistema. Sin embargo, la regla a seguir es que, si el costo de la falla es lo suficientemente alto, la redundancia es una opción atractiva

7. REFERENCIAS

Araque G, J. A., Diaz R, J. L., & Gualdrón G, O. E. (2012). THD OPTIMIZATION OF A SINGLE PHASE MULTILEVEL INVERTER USING GENETIC ALGORITHMS. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*.

Araujo Ribeiro, R. L., Jacobina, C. B., da Silva, E. R. C., & Lima, A. M. N. (2004). Fault-tolerant voltage-fed PWM inverter AC motor drive systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *51*(2), 439–446. https://doi.org/10.1109/TIE.2004.825284

Chappa, A., Gupta, S., Sahu, L. K., & Gupta, K. K. (2021). A Fault-Tolerant Multilevel Inverter Topology With Preserved Output Power and Voltage Levels Under Pre- and Postfault Operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *68*(7), 5756–5764. https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2994880

Chatzakis, J., & Antonidakis, E. (2008). A novel N+k fault-tolerant hot-swap DC/AC inverter design. *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 3291–3294. https://doi.org/10.1109/PESC.2008.4592461

Chen, A., Hu, L., Chen, L., Deng, Y., & He, X. (2005). A multilevel converter topology with fault-tolerant ability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *20*(2), 405–415. https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.842983

Choi, J., Han, B., & Kim, H. (2016). New Scheme of Phase-Shifted Carrier PWM for Modular Multilevel Converter With Redundancy Submodules. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *31*(1), 407–409. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2473101

Desai, E., & Shah, N. (2013). Comparative analysis of multilevel inverter topologies for photovoltaic system. *2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/NUiCONE.2013.6780149

Fard, M. T., Khan, W. A., He, J., Weise, N., & Abarzadeh, M. (2020). Fast online diagnosis of open-circuit switching faults in flying capacitor multilevel inverters. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, *6*(4), 53–62. https://doi.org/10.23919/CJEE.2020.000030

Farhadi, M., Fard, M. T., Abapour, M., & Hagh, M. T. (2018). DC–AC Converter-Fed Induction Motor Drive With Fault-Tolerant

ISSN: 2992-8338

Capability Under Open- and Short-Circuit Switch Failures. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *33*(2), 1609–1621. https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2683534

Guo, J., Wang, X., Liang, J., Pang, H., & Goncalves, J. (2018). Reliability modeling and evaluation of MMCs under different redundancy schemes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *33*(5), 2087–2096. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2715664

Guo, J., Wang, X., Liang, J., Pang, H., & Gonçalves, J. (2018). Reliability Modeling and Evaluation of MMCs Under Different Redundancy Schemes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *33*(5), 2087–2096. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2715664

Hekmati, P., Brown, I., & Shen, Z. (2021). Open Circuit Switch Fault Detection in Flying Capacitor and Cascaded H-Bridge Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *36*(11), 12332–12341. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3078158

Jahan, H. K., Panahandeh, F., Abapour, M., & Tohidi, S. (2018). Reconfigurable Multilevel Inverter With Fault-Tolerant Ability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *33*(9), 7880–7893. https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2773611

Kang, J., Kim, H., Jung, H.-J., Lee, D.-S., Kim, C.-K., Mantooth, H. A., & Hur, K. (2019). On Exploiting Active Redundancy of a Modular Multilevel Converter to Balance Reliability and Operational Flexibility. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *34*(3), 2234–2243. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2846406

Kim, S.-M., Lee, J.-S., & Lee, K.-B. (2016). A Modified Level-Shifted PWM Strategy for Fault-Tolerant Cascaded Multilevel Inverters With Improved Power Distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *63*(11), 7264–7274. https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2547917

Konstantinou, G., Pou, J., Ceballos, S., & Agelidis, V. G. (2013). Active Redundant Submodule Configuration in Modular Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *28*(4), 2333–2341. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2264950

Koshti, A. K., & Rao, M. N. (2017). A brief review on multilevel inverter topologies. *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI)*, 187–193. https://doi.org/10.1109/ICDMAI.2017.8073508

Kumar, D., Nema, R. K., Gupta, S., Nema, S., & Dewangan, N. K. (2022). A New Fault-Tolerant Multilevel Inverter Topology with Enhanced Reliability for PV Application. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*(11), 14841–14858.

Kumar, N. K., Muthyala, U. R., & Dhabale, A. (2019). Optimized Multilevel Inverters Derived From Generalized Asymmetrical Topology. *2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/IFEEC47410.2019.9014986

Li, B., Shi, S., Wang, B., Wang, G., Wang, W., & Xu, D. (2016). Fault Diagnosis and Tolerant Control of Single IGBT Open-Circuit Failure in Modular Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *31*(4), 3165–3176. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2454534

Li, B., Xu, Z., Ding, J., & Xu, D. (2018). Fault-Tolerant Control of Medium-Voltage Modular Multilevel Converters With Minimum Performance Degradation Under Submodule Failures. *IEEE Access*, *6*, 11772–11781. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2811904

Li, B., Zhang, Y., Yang, R., Xu, R., Xu, D., & Wang, W. (2015). Seamless Transition Control for Modular Multilevel Converters When Inserting a Cold-Reserve Redundant Submodule. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *30*(8), 4052–4057. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2392778

Mhiesan, H., Wei, Y., Siwakoti, Y. P., & Mantooth, H. A. (2020). A Fault-Tolerant Hybrid Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *35*(12), 12702–12715. https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2996097

Oh, H., Han, B., McCluskey, P., Han, C., & Youn, B. D. (2015). Physics-of-failure, condition monitoring, and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *30*(5), 2413–2426. https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2346485

Ou, L., Peng, Z., Liu, Z., Peng, X., & Wang, J. (2020). Redundancy Operation of Modular Inverter Based on Si/SiC Hybrid Switch. *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*, 1880–1883. https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367712

Patel, M. D., Pandya, D. J., Raval, D. Y., & Yagnik, N. Y. (2019). Fault-Tolerant Structure for Cascaded H-bridge Multilevel Inverter using Relays. *2019 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 8–13. https://doi.org/10.1109/ICCPEIC45300.2019.9082384

Reddy, B. P., Rao A, M., Sahoo, M., & Keerthipati, S. (2018). A Fault-Tolerant Multilevel Inverter for Improving the Performance of a Pole–Phase Modulated Nine-Phase Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *65*(2), 1107–1116. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2733474

Verde, C., Gentil, S., & Morales-Menéndez, R. (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos* (Editorial Trillas).

Wang, J., Ma, H., & Bai, Z. (2018). A Submodule Fault Ride-Through Strategy for Modular Multilevel Converters with Nearest Level Modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *33*(2), 1597–1608. https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2679439

Zhou, W., Yang, H., Yang, H., Chen, M., Li, W., He, X., & Han, J. (2019). A Statistical Submodule Open-circuit Failure Diagnosis Method for MMCs Enabling Failure Detection, Localization and Classification. *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2356–2361. https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8721882

ISSN: 2992-8338

The impact of ambient temperature variations on the cooling system of a photobioreactor and its relationship with energy consumption

J. Arenas-Robles* J-G. Valenzuela-Páez* M. Adam-Medina* M-A. Franco-Nava J-C. Franco-Ortega** O. Guevara-Peredia****

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*

(e-mail: m22ce007@cenidet.tecnm.mx).

*** Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Mazatlán, Mazatlán Sinaloa, México.*

Abstract: This article analyzes the energy demand of the cooling system of a photobioreactor, the ambient temperature and its relationship with the electrical consumption, since the electrical consumption of the cooling system represents an important part of the operating costs of a photobioreactor. This study was conducted in a laboratory located in the region of Mazatlán, Mexico, a region known for its warm and sunny climate during most of the year, so it is analyzed how the ambient temperature influences the electrical energy demand for cooling the system since, to maintain the temperature of a culture medium within the optimal ranges, an efficient cooling system is required and this generates an impact on electricity consumption, which is associated with the ambient temperature.

Keywords: photobioreactor, electricity consumption, environment, cooling system, temperature control, biomass.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la sociedad ha incrementado el consumo de combustibles fósiles, a un ritmo que se hace casi insostenible. A este aspecto se suma el actual escalado del precio de petróleo. Por tanto, se demandan urgentemente fuentes alternativas de energía, una opción destacada es la utilización de biocombustibles como, por ejemplo, el biodiésel (Pfeiffer, 2019)

En los últimos años existe una tendencia conocida como química sustentable, la cual se centra en investigar sobre nuevas formas de sintetizar sustancias químicas de forma que se reduzcan o se eliminen los productos químicos que contaminan y causan daños al medio ambiente (Abelardo Jaramillo, 2017).

En el área de la investigación y desarrollo de la tecnología, los fotobiorreactores se han convertido en una excelente herramienta para la producción sostenible de biocombustibles y productos bioquímicos (Moreno et al., 2021). Estos dispositivos contribuyen a la aceleración del proceso de la fotosíntesis de algunos microorganismos, como las microalgas, para convertir la energía solar en biomasa y la generación de productos útiles para el ser humano (Cortés Josué, 2018).

Para un fotobiorreactor, el consumo eléctrico depende de varios factores, como el tamaño y la configuración del fotobiorreactor, las condiciones de operación, la iluminación utilizada, el tipo de microorganismos cultivados, así como otros parámetros relacionados (Jiménez Abraham, 2017).

Uno de los aspectos más importantes para el buen funcionamiento de los fotobiorreactores, es el control de la temperatura. Las condiciones térmicas adecuadas son esenciales para maximizar la actividad fotosintética y la productividad en la cosecha de microorganismos, por lo que la importancia de controlar la temperatura en este contexto, no solo se vincula estrechamente con la eficiencia del sistema de enfriamiento, sino también con la optimización del consumo eléctrico (Alonso Alexis, 2020).

A medida que se avanza en este artículo, se explora el funcionamiento del sistema de control de la temperatura en el fotobiorreactor que fue diseñado y construido en el año 2010, y que se encuentra ubicado en el Instituto Tecnológico de Mazatlán (ITMAZ), como resultado de la colaboración entre esta institución y el centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico (CENIDET).

Se explora minuciosamente el proceso empleado para generar y extraer los datos relacionados con dicho sistema, destacando la importancia de esta información en el contexto del comportamiento dinámico del consumo eléctrico.

Además, se establece una relación entre la temperatura del medio ambiente y el mencionado consumo eléctrico, y se presentan gráficas que ilustran de manera efectiva esta relación. Demostrando que el consumo eléctrico del sistema de control de temperatura en este fotobiorreactor depende de las condiciones de temperatura del medio ambiente.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

ISSN: 2992-8338

Este dispositivo, destinado al cultivo de las microalgas de tipo *Nannochloropsis Oculata*, opera mediante varios subsistemas (Salinidad, pH, aireación, iluminación y temperatura), interrelacionados, cada uno cumpliendo una función distintiva y esencial para el rendimiento global del mismo.

La gestión cuidadosa de la salinidad en el sistema es controlada a través de la inyección de agua destilada y el control de pH que se logra con el suministro de dióxido de carbono, estos dos sistemas contribuyen a mantener la homeostasis osmótica y la estabilidad bioquímica, respectivamente, elementos esenciales para la salud celular.

El sistema de aireación o mezcla, mueve el cultivo mediante el suministro controlado de aire a través de un compresor, asegurando una distribución homogénea de las microalgas dentro del fotobiorreactor, permitiendo que cada célula reciba una exposición uniforme a la iluminación central. Esta disposición lumínica (sistema de iluminación) proporciona los fotones esenciales para la fotosíntesis.

Por último, el sistema de control de temperatura, desempeña una función esencial al mantener constante la temperatura del medio de cultivo a 25 grados Celsius. Este control térmico preciso no solo asegura condiciones ideales para la salud y reproducción de las microalgas, sino que también potencia las reacciones bioquímicas, favoreciendo la eficiencia fotosintética y la producción de biomasa.

Cada uno de estos subsistemas, en su armoniosa integración, reflejan la complejidad y sinergia necesarias para lograr un sistema de cultivo de microalgas eficaz y sostenible.

3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

La temperatura del medio de cultivo en este sistema es monitoreada y controlada a través de un software de la marca "*Sitrad"* que cuenta con una comunicación tipo serie, hacía un monitor en donde se muestra y se almacenan en una base los datos obtenidos (véase la Figura 1).

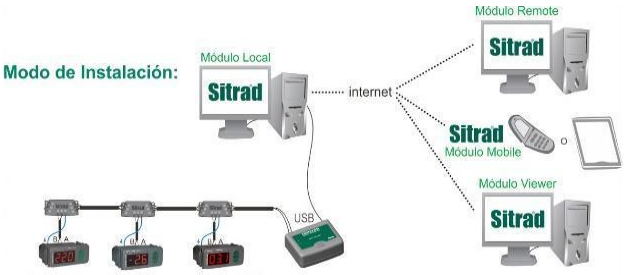


Figura 1. Diagrama de conexión del software de la marca *"Sitrad"*

Los datos se obtienen debido a que cada uno de los módulos de *Sitrad* cuenta con un par de sensores sumergibles que estratégicamente fueron instalados en el sistema de control de temperatura, el software registra los datos de temperatura de los fluidos refrigerantes y cuando se alcanza la temperatura de referencia que se coloca en el software, los sensores controlan el encendido y apagado de los dos actuadores:

1. Bomba de agua.

2. Intercambiador de calor primario tipo chiller.

La Figura 2, muestra un diagrama representativo de las tuberías, los dos actuadores y la ubicación de los sensores, así como el sentido de circulación del glicol al 50%.

En el sistema, la bomba de agua se encarga de que el glicol que se encuentra almacenado en un recipiente de material tipo adiabático, circule a través de todo el sistema por unas tuberías que atraviesan el interior del chiller (intercambiador de calor primario) y de las tuberías que se encuentran inmersas en el medio de cultivo del fotobiorreactor (intercambiador de calor secundario) logrando así el intercambio térmico.

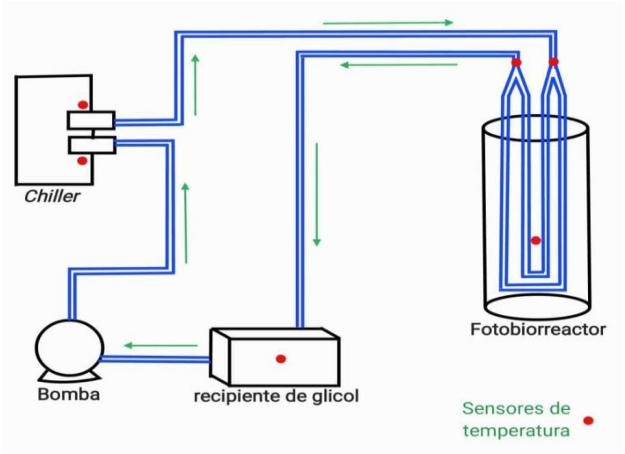


Figura 2. Diagrama representativo del sistema de control de temperatura

El segundo actuador en el sistema se denominó "*Chiller"*, es un intercambiador de placas que trabaja con un refrigerante de tipo R22 y que, al circular a contracorriente con el glicol a través de él, el *Chiller* se encarga de mantener el glicol dentro de un margen de temperatura adecuada cada cierto tiempo.

Estos dos actuadores al trabajar durante varios periodos de tiempo, implican un aumento en el consumo eléctrico de todo el Fotobiorreactor.

4. METODOLOGÍA

Para conocer el consumo eléctrico nominal del sistema de control de temperatura, se combinó la ley de Watt con la ley de Joule tomando en cuenta las potencias eléctricas nominales y tiempos de operación reales.

La siguiente tabla muestra los datos nominales de los dos actuadores.

Tabla 1. Datos nominales de los actuadores

Actuador	*Chiller*	Bomba
Potencia	1600 W	120 W
Amperaje	7.7 A	0.944 A
Voltaje	220 V	127 V
Capacidad	18000 BTU	35 l/min

La base de datos de *Sitrad*, contiene las temperaturas que se registraron en un periodo de prueba experimental que se realizó durante el periodo de octubre-noviembre del año 2022, como estos datos se encuentran dentro del software en el

ISSN: 2992-8338

mismo *Sitrad*, para conocer los tiempos de operación reales se realizó la extracción de datos de forma manual con los cuales se obtuvieron varias hojas de Excel de todos los días que duró el experimento y cada hoja arrojó datos del encendido y apagado de cada uno de los actuadores.

Teniendo los datos y el tiempo en el que el sistema de control de temperatura duró encendido cada día, se extendió la investigación para para la obtención del consumo eléctrico en kWh por día, por lo que se diseñó y ejecutó en el software MatLab un código de programación que funciona, según el diagrama 1.

Diagrama 1. Funcionamiento del código diseñado en MatLab

Tomando en cuenta que:

La energía se mide en Watts por segundo.

$$J = (s)(W) \quad (1)$$

Y la ley de Joule establece la cantidad de calor que se genera en un conductor con resistencia cuando una corriente pasa a través de él.

$$Q = (t)(R)I^2 \quad (2)$$

Relacionando la ley de Ohm

$$V = (I)(R) \quad (3)$$

y la ley de Watt

$$P = (V)(I) \quad (4)$$

Se obtiene la equivalencia Watt/Joule

$$\boldsymbol{E = (P)(t)} \quad (5)$$

Donde Q es la energía en Joules (J), I la corriente en amperes (A), R la resistencia ohmios (Ω), t el tiempo en segundos (s), V el voltaje en voltios (V), P la potencia en Watts (W) y E los kilowatts por hora (kWh).

5. RESULTADOS

La siguiente tabla 2, muestra los resultados obtenidos durante 24 días del mes de noviembre que operó el sistema de control de temperatura. Dónde, la columna D-Max es el tiempo de duración máxima, la columna D-Min el tiempo de duración mínima y la columna T-P el tiempo promedio, en encendido. Así como, la columna T-ON es el total de veces que se encendió el sistema y la columna C.E.T es el consumo eléctrico total que se generó en el día.

Tabla 2. Resultados obtenidos durante 24 días del mes de noviembre

Día	D-Max	D-Min	T-P	T-ON	C.E.T
1	133 s	107 s	118 s	71	4.028 kWh
2	127 s	108 s	118 s	73	4.068 kWh
3	127 s	111 s	118 s	72	4.064 kWh
4	217 S	107 S	120 s	72	4.132 kWh
5	128 s	107 s	128 s	72	4.039 kWh
6	128 s	58 s	117 s	62	3.428 kWh
7	127 s	110 s	116 s	51	2.780 kWh
8	128 s	105 s	128 s	28	1.471 kWh
9	128 s	108 s	118 s	71	4.066 kWh
10	127 s	107 s	118 s	70	3.912 kWh
11	126 s	108 s	117 s	70	3.870 kWh
12	128 s	107 s	116 s	69	3.799 kWh
13	132 s	106 s	117 s	79	4.389 kWh
14	132 s	107 s	118 s	87	4.871 kWh
15	130 s	108 s	119 s	90	5.061 kWh
16	125 s	107 s	115 s	78	4.235 kWh
17	129 s	94 s	114 s	82	4.501 kWh
18	128 s	107 s	115 s	79	4.311 kWh
19	128 s	109 s	117 s	74	4.104 kWh
20	129 s	108 s	119 s	68	3.82 kWh
21	133 s	112 s	118 s	66	3.822 kWh
22	128 s	107 s	116 s	69	3.979 kWh
23	154 s	105 s	122 s	71	4.052 kWh
24	117 S	107 S	120 S	72	4.032 kWh

ISSN: 2992-8338

La figura 3 constituye una representación que traza el comportamiento dinámico del consumo eléctrico a lo largo de un periodo de 24 horas, específicamente enfocado en el sistema de control de temperatura. Este análisis gráfico, centrado en el día 10 de noviembre, ofrece una perspectiva completa de las variaciones horarias y los patrones de demanda eléctrica que caracterizan el funcionamiento del sistema.
La riqueza de datos presentados en esta figura proporciona una herramienta visual esencial para la comprensión profunda de las fluctuaciones energéticas a lo largo del día, permitiendo identificar momentos clave de eficiencia y desafíos energéticos dentro del ciclo operativo del fotobiorreactor.
Esta visualización, respaldada por datos precisos y meticulosamente recopilados, se erige como un recurso valioso para la toma de decisiones informadas y la optimización continua de la eficiencia energética en el marco del control de temperatura del fotobiorreactor.

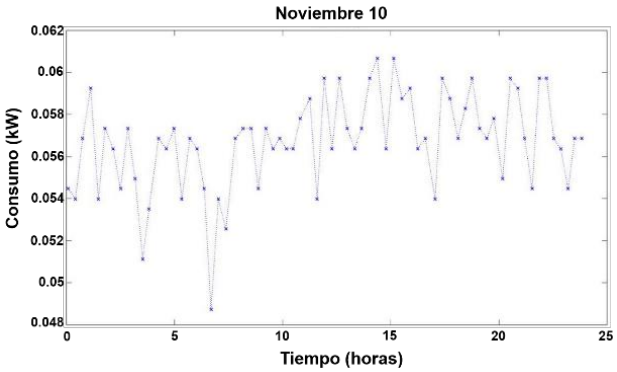


Figura 3. Comportamiento del consumo eléctrico del sistema de control de temperatura del día 10 de noviembre del 2022

De igual manera, la figura 4, presenta de forma gráfica la dinámica del consumo eléctrico a lo largo de un extenso periodo de 24 horas, centrándose específicamente en el sistema de control de temperatura. Este análisis gráfico, focalizado en el día 21 de noviembre, proporciona una representación completa y minuciosa de las variaciones horarias y los perfiles de demanda eléctrica que caracterizan la operatividad del sistema.
La riqueza de información en ambas gráficas no solo enriquece la comprensión de las fluctuaciones energéticas diarias, sino que también permite identificar patrones y tendencias específicas que pueden ser esenciales para perfeccionar la gestión de la energía, facilitando la identificación de oportunidades de mejora y la implementación de estrategias eficaces para optimizar la eficiencia energética en el contexto del control de temperatura del fotobiorreactor.

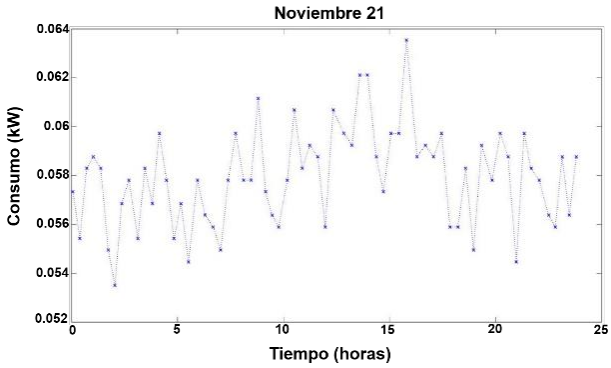


Figura 4. Comportamiento del consumo eléctrico del sistema de control de temperatura del día 21 de noviembre del 2022

Nota: Los puntos representan las veces que se encendió el sistema.

Tomando en cuenta el análisis de la ley de Watt y la ley de Joule, con el objetivo de ofrecer una visión detallada y visual de la dinámica del consumo eléctrico en el sistema, la figura 5, presenta una gráfica reveladora que ilustra la evolución precisa del consumo eléctrico generado en el fotobiorreactor a lo largo del tiempo en un periodo de siete días.

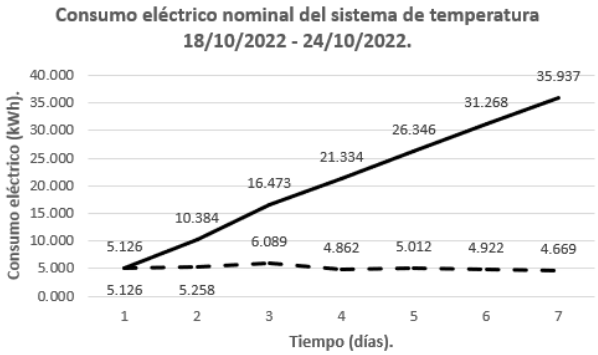


Figura 5. Dinámica del consumo eléctrico en el sistema de control de temperatura

La gráfica muestra una perspectiva cuantitativa que complementa la descripción detallada del sistema, permitiendo explorar visualmente la influencia del control térmico en la salud y productividad de la *Nannochloropsis Oculata* en el fotobiorreactor.
Con estos resultados, se realiza un análisis del comportamiento de la temperatura y la relación que existe entre temperatura y consumo eléctrico.
Se muestra a continuación en la Figura 6, un gráfico del comportamiento de la temperatura promedio del día 10 de noviembre del 2022 en ciudad Mazatlán Sinaloa con datos de la página web weatherspark [7]. Esta página proporciona información estadística del tiempo, y la razón por la que se

ISSN: 2992-8338

usaron esos datos es porque no se podían obtener en ese momento datos reales.

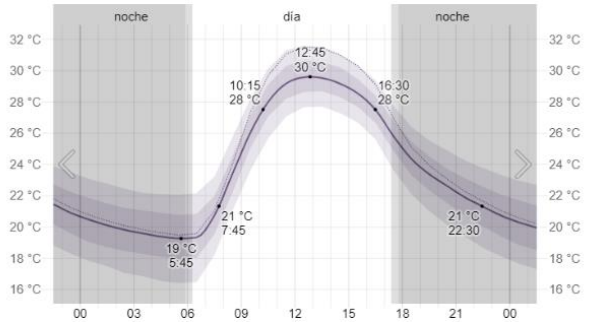


Figura 6. Temperatura promedio del día 10 de noviembre del 2022 en ciudad Mazatlán Sinaloa [7]

De la gráfica de la figura 6 se obtiene la temperatura en momentos del día, de la tabla 2, se obtienen los consumos eléctricos en esos momentos, por lo tanto, los datos del consumo y temperatura del día 10 de noviembre del 2022 se muestran en la siguiente tabla 3

Tabla 3. Consumo y temperatura del día 10 de noviembre

N	Horas del día	Temperatura	Consumo
1°	05:45:00 a. m.	19 °C	0.0569 kWh
2°	10:15:00 a. m.	28 °C	0.0578 kWh
3°	12:45:00 p. m.	30 °C	0.0597 kWh
4°	04:30:00 p. m.	28 °C	0.0579 kWh
5°	10:30:00 p. m.	21 °C	0.0568 kWh

Con los datos de la tabla 3 se obtiene la gráfica de la Figura 7, que muestra la relación del consumo y la temperatura.

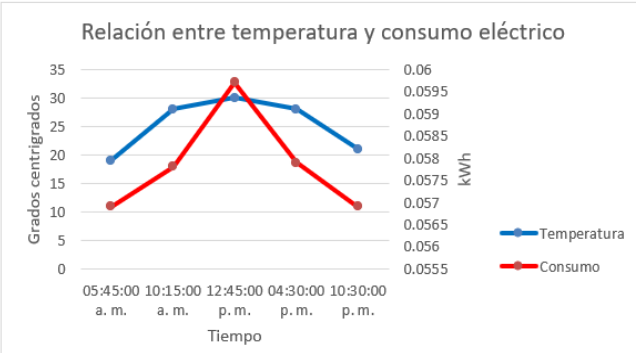


Figura 7. Relación entre temperatura y consumo eléctrico

6. DISCUSIONES

Uno de los hallazgos fundamentales y reveladores que emerge de esta investigación radica en la evidente y significativa influencia que la temperatura ambiente ejerce sobre la demanda de energía eléctrica necesaria para sustentar el óptimo funcionamiento del sistema de enfriamiento del fotobiorreactor. Este descubrimiento, respaldado por meticulosos análisis y datos recopilados a lo largo de la investigación, pone de manifiesto la compleja interrelación entre las variaciones de temperatura en el entorno circundante y los requisitos energéticos específicos del sistema de control de la temperatura.

La comprensión detallada de esta relación proporciona una perspectiva crucial para la optimización de los procesos energéticos en el contexto del cultivo de microalgas, abriendo nuevas posibilidades para la eficiencia y sostenibilidad en la operación del fotobiorreactor.

Como se observó en los datos recopilados, cuando la temperatura ambiental es alta, el sistema de enfriamiento debe trabajar de manera más intensa y constante para mantener la temperatura del medio de cultivo dentro de los rangos óptimos. Esto conlleva a un aumento significativo en el consumo eléctrico, lo que puede impactar de manera negativa en los costos operativos del fotobiorreactor.

Este vínculo entre la temperatura ambiente y el consumo eléctrico subraya la necesidad de desarrollar estrategias de gestión eficiente para los sistemas de enfriamiento en regiones con climas similares a Mazatlán. Esto podría incluir la implementación de sistemas de control que se adapten de manera dinámica a las condiciones climáticas, optimizando así el consumo energético y reduciendo los costos asociados.

7. CONCLUSIONES

En ambas gráficas de la figura 3 y la figura 4, se observa que el consumo eléctrico menor se encuentra en las primeras horas del día (en la madrugada) y el mayor pasando las 15:00 hrs de la tarde.

Por lo tanto, es prudente decir que cuando la temperatura del medio ambiente aumenta, la temperatura del medio de cultivo también aumenta, por lo tanto, es necesario disminuir un mayor rango de temperatura, esto ocasiona que el sistema de control de temperatura dure más tiempo conectado y esto a su vez genera un aumento en el consumo eléctrico.

En otras palabras: El consumo eléctrico del sistema de control de temperatura del fotobiorreactor, depende de las condiciones de temperatura del medio ambiente.

En conclusión, este estudio ofrece una perspicaz comprensión de la interacción entre la temperatura ambiental y el sistema de enfriamiento de un fotobiorreactor en la región de Mazatlán. Los resultados resaltan la necesidad de abordar eficazmente el consumo eléctrico asociado al enfriamiento, lo que puede ser crucial para el éxito económico y medioambiental de los fotobiorreactores en regiones similares.

8. REFERENCIAS

Pfeiffer, d. A. (1950). Polis revista latinoamericana comemos combustibles fósiles nous mangeons des carburants fossiles we eat fossil fuels.

Alonso alexis. (2020). Modelado y control de temperatura de un fotobiorreactor escala piloto con intercambiador de calor. Cenidet .

ISSN: 2992-8338

Institute of electrical and electronics engineers. (n.d.). The tenth international renewable energy congress : 2019 10th international renewable energy congress (irec) : march 26-28, 2019, sousse, tunisia.

Jiménez abraham. (2017). Diseño, modelado y control de un fotobiorreactor. Cenidet.

Moreno, j. C., mercader, p., guzman, j. L., banos, a., & gutman, p. O. (2021). Evaluation of an interpolated controller in an industrial photobioreactor. Ieee access, 9, 24406–24415. Https://doi.org/10.1109/access.2021.3057031

Para, f., & de biodiesel, l. O. (n.d.). Universidad nacional del callao facultad de ingenieria quimica unidad de investigacion de la facultad de ingenieria quimica informe final de investigacion "cultivo de microalga chlorella sp en un.

Weatherspark - mazatlán, méxico." Disponible en: https://es.weatherspark.com/d/3239/11/10/tiempo-promedio-el-10-de-noviembre-en-ciudad-mazatl%c3%a1n-m%c3%a9xico#figures-temperature. Accedido el 11 de octubre de 2023.

A. Jaramillo et, al “análisis técnico en el ahorro de energía Eléctrica en motores de inducción de corriente alterna” (unitec). 2017

C. Josué et al., “implementación de eficiencia energética en Motores eléctricos trifásicos por medio del uso de variador de velocidad” 2018

ISSN: 2992-8338

Modelling the kinetics of transesterification reaction of vegetable oils: Simulating biodiesel production

S. Vázquez, I. Casarrubias** A. Acevedo-Quiroz* J. García-Morales* P. E. Álvarez-Gutiérrez*** M. Adam-Medina***

** Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: abisai.aqp@cenidet.tecnm.mx, manuel.am@cenidet.tecnm.mx, : jarniel11e@cenidet.tecnm.mx).*

*** Universidad Politécnica del Estado de Morelos. Paseo Cuauhnáhuac 566, Lomas del Texcal, 62574 Jiutepec, Morelos. (e-mail: cvio201797@upemor.edu.mx, vmso201301@upemor.edu.mx)*

**** Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 29050, México, (e-mail: peggy.ag@tuxtla.tecnm.mx)*

Abstract: This work presents the transesterification reaction model to predict the concentration profiles of the reactants and products in biodiesel production. For the solution of the system of differential equations, an ode 45 solver from the Matlab program was used. The model was validated with data reported in the literature. Results show that the model successfully calculates the concentration profile of triglyceride, alcohol and biodiesel in time. The kinetic model of jatropha oil demonstrated a higher biodiesel conversion of 0.9993 mol/L for a period of 15 minutes, while for palm and soybean oil, the reaction is carried out up to 25 minutes, With a concentration of 0.9965 and 0.9957, respectively. Transesterification was carried out at 50°C, oil – to – methanol molar ratio of 1:6, Using 0.2wt% of sodium hydroxide.

Keywords: Biodiesel, vegetable oils, modelling, transesterification, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

El uso y el consumo de combustibles fósiles está cambiando gracias a las nuevas tecnologías que se enfocan por encontrar fuentes de energía alternativas de combustibles más amigables con el medio ambiente, que sean renovables, económicos y fáciles de producir (Martínez - Sánchez et al., 2022). Esto es, por que el consumo de energía es cada vez más demandado por la industria y en general por el creciente índice de la población a nivel mundial, y que, son los principales causantes de la problemática ambiental en la cual vivimos hoy en día (Liu et al., 2021). Una de estas alternativas es el uso de biocombustibles líquidos, como el caso del Biodiésel, que se considera un combustible verde, gracias a sus virtudes, como, su renovabilidad, biodegradabilidad, excelente rendimiento de combustión y muy bajas emisiones al medio ambiente (Orege et al., 2022). El biodiésel se puede clasificar de primera, segunda o tercera generación de acuerdo al tipo de materia prima que se utilice; el biodiésel de primera generación es aquel que se obtiene a partir de aceites vegetales, el de segunda generación por aceites de desecho o aceites no comestibles y el de tercera generación se obtiene por microalgas (Pan et al., 2022). El biodiésel se puede definir como, ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga obtenidos por aceites vegetales o grasas de animales con o sin catalizadores (Sahani et al., 2020). En la última década el proceso de obtención del biodiésel ha recibido gran atención tanto en la industria como en trabajos de investigación, debido a que puede ser utilizado en el sector de transporte y generación de energía eléctrica (Reza-Talaghat et al., 2020). Uno de los principales problemas para la conversión de los triglicéridos a combustible biodiésel está asociado a la alta viscosidad y baja volatilidad. Para combatir estos problemas se han estudiados diversos métodos de producción del biodiesel, tales como: la dilución, la pirólisis, la microemulsión, y la transesterificación (Nayab et al., 2022), este último proceso es una de las metodologías más aceptadas para la conversión a biodiésel. La transesterificación es una conversión química del aceite en su correspondiente éster graso, también se le conoce como alcohólisis, que es una reacción de un triglicérido de grasa o aceite con un alcohol para formar ésteres y glicerol, generalmente utiliza un ácido o una base como catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento (Brásio et al., 2013).

Ataya et al. (2008) realizaron un estudio experimental demostrando la importancia de la transferencia de masa en las velocidades de reacción de la transesterificación, desarrollaron un modelo para predecir las concentraciones de los reactantes y el biodiésel, el modelo fue validado con resultados experimentales, demostrando que el 80% de los triglicéridos reaccionan en los 10 primeros minutos de la reacción, el modelo se acopló a los resultados experimentales. Concluyeron que el modelo podría utilizarse para estimar valores de la energía de activación para diferentes constantes de velocidades de reacción. Otro estudio realizado por Adokiye et al. (2020) propusieron un modelo dinámico para la predicción de las concentraciones de los reactantes y productos

ISSN: 2992-8338

para la producción de biodiésel en un reactor continuo de tanque agitado empleando aceite de cocina usado, también implementaron un controlador proporcional – integral (PI), obteniendo una ganancia proporcional $K_C = 8.306$ y un tiempo integral de t = 17.15 minutos, demostraron que la concentración de biodiésel va aumentando hasta los primeros 12 segundos, después llega gradualmente al equilibrio. Un estudio similar fue propuesto por Racar et al. (2020) donde estudiaron la producción de biodiésel usando aceite de girasol, el estudio se basa sobre la influencia de la relación molar entre el alcohol – aceite, de 3:1 a 15:1, con concentración del catalizador de 0.5 a 3% en peso, la temperatura evaluada fue de 40 a 80°C con un tiempo de reacción de 40 a200 min, respectivamente. El modelo empírico desarrollado demostró que a 1.13% en peso del catalizador y relación molar de 11:1 a temperatura de 67.9°C fueron las condiciones óptimas para tener una conversión del 94.6%.

Por consiguiente, el enfoque de este estudio se basa en estudiar la cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel a partir del aceite vegetal de palma, soya y jatrofa, la selección de estos aceites se basa porque son fáciles y económicamente de conseguir, y han sido ampliamente estudiados, ya que presenta una parte vital para llevar a cabo este tipo de análisis en la etapa experimental y posteriormente realizar un modelado y control de un reactor de tubo helicoidal. También, con los resultados de este estudio se pretende realizar análisis en reactores continuos, que en literatura está limitada su aplicación. Es por ello que, el presente trabajo se tiene como tema central evaluar el perfil de la concentración de los esteres metílicos (biodiésel) en diferentes tipos de aceites vegetales para implementarlo en reactor de tubo helicoidal experimental, como se muestra en la figura 1.

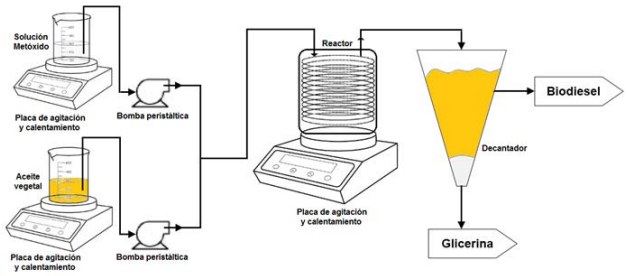


Figura 1. Diagrama esquemático del proceso para la producción de Biodiésel por transesterificación en un Reactor Tubular Continuo.

2. MODELACIÓN DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

2.1 Proceso de transesterificación

La transesterificación es la reacción química de aceites vegetales o grasas animales (triglicéridos) con algún tipo de alcohol para producir glicerol y ésteres monoalquílicos, también conocidos como biodiésel (Fonseca et al. 2010). De manera general, la reacción química se lleva a cabo entre una molécula de Triglicéridos (TG) con tres moléculas de alcohol de bajo peso molecular (A), en presencia de un catalizador, obteniendo como producto tres moléculas de metil éster (ME) y una de glicerina (GL), como se muestra en la siguiente reacción:

$$TG + 3A \overset{K_b - K_a}{\longleftrightarrow} GL + 3ME \qquad (1)$$

Donde, en la reacción (1), *Ka* representa la constante de velocidad de la reacción de los reactantes a productos (triglicéridos y alcohol) y *Kb* representa la constante de velocidad reversible de los productos a reactantes. De forma más especifica el proceso de transesterificación se lleva a cabo mediante 3 reacciones intermediarias reversibles, dando la formación de subproductos, tales como digliceridos (DG) y monogliceridos (MG), en cada una de las reacciones se tiene su propia constante de velocidad, a continuación, se presentan las reacciones intermedias del proceso de esterificación:

$$TG + A \overset{K_1 - K_2}{\longleftrightarrow} DG + R_1ME \qquad (2)$$

$$DG + A \overset{K_3 - K_4}{\longleftrightarrow} MG + R_2ME \qquad (3)$$

$$MG + A \overset{K_5 - K_6}{\longleftrightarrow} GL + R_1ME \qquad (4)$$

Las cinéticas químicas de estas ecuaciones (ecuación 2 a la 4) no son lineales y fueron validadas y estudiadas experimentalmente. Para el estudio de este trabajo se utilizó el modelo cinético de segundo orden con reacciones reversibles propuesto por Narvaez et al. (2007).

2.2 Modelado de la cinética

El modelo de la cinética de transesterificación ha sido propuesto y validado por diferentes autores, con diferentes condiciones de operación, aunque la mayoría en procesos discontinuos y muy poco en literatura para procesos de producción continua. Por lo tanto, el modelo está compuesto por un conjunto de 6 ecuaciones diferenciales, caracterizando la cinética de la reacción de cada paso desde el triglicérido hasta obtener el metil éster correspondiente. El modelo se describe en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d[TG]}{dt} = -k_1[TG][A] + k_2[DG][ME] \qquad (5)$$

$$\frac{d[DG]}{dt} = -k_3[DG][A] + k_4[MG][ME] + k_1[TG][A] - k_2[DG][ME] \qquad (6)$$

$$\frac{d[MG]}{dt} = -k_5[GL][ME] + k_6[GL][ME] + k_3[DG][A] - k_4[MG][ME] \qquad (7)$$

$$\frac{d[GL]}{dt} = k_5[MG][A] - k_6[GL][ME] \qquad (8)$$

$$\frac{d[E]}{dt} = k_1[TG][A] - k_2[DG][ME] + k_3[DG][A] - k_4[MG][ME] + k_5[MG][A] - k_6[GL][ME] \qquad (9)$$

$$\frac{d[A]}{dt} = -k_1[TG][A] + k_2[DG][ME] - k_3[DG][A] + k_4[MG][ME] - k_5[MG][A] + k_6[GL][ME] \qquad (10)$$

$$\frac{d[A]}{dt} = \frac{d[ME]}{dt} \qquad (11)$$

Donde las constantes K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 y K_6, son las constantes cinéticas que intervienen en cada una de las reacciones y las

ISSN: 2992-8338

[TG], [DG], [MG], [MG], [GL] y [A], son las concentraciones molares de cada componente que intervienen en las reacciones. Además, los autores establecieron las constantes de reacción en función de la temperatura y determinaron las energías de activación de acuerdo a la ecuación de Arrhenius, que viene dada:

$$K_a = Ae^{\frac{-E_A}{RT}} \qquad (12)$$

Donde, A es el factor pre-exponencial, E_A es la energía de activación (kJ mol^{-1}), T es la temperatura (K) y R la constante de los gases ideales (kJ mol^{-1} K^{-1}). Para este estudio las constantes de velocidad fueron tomadas de literatura por medio de estudios experimentales para los aceites de palma, jatrofa y soya. Estos valores se pueden observar en la tabla 1, tabla 2 y tabla 3.

Tabla 1. Constantes de velocidad para el aceite de jatrofa (Berchmans et al., 2010)

Constante	Parámetros ($L * mol^{-1}\ min^{-1}$)
K_1	0.073
K_2	0.0528
K_3	0.3347
K_4	0.1655
K_5	0.3869
K_6	0.008

Tabla 2. Constantes de velocidad para el aceite de palma (Narváez et al., 2007)

Constante	Parámetros ($L * mol^{-1}\ min^{-1}$)
K_1	0.049
K_2	0.112
K_3	0.226
K_4	0.133
K_5	0.122
K_6	0.016

Tabla 3. Constantes de velocidad para el aceite de haba de soya (Noureddini et al., 1997)

Constante	Parámetros ($L * mol^{-1}\ min^{-1}$)
K_1	0.05
K_2	0.11
K_3	0.215
K_4	1.228
K_5	0.242
K_6	0.007

Es importante recordar que para este estudio solo se tomaron datos experimentales validados de modelos cinéticos con reacciones reversibles reportados en literatura.

3. RESULTADOS

Se consideró la reacción de transesterificación de los triglicéridos de los aceites vegetales de palma, jatrofa y soya, para la obtención de biodiésel. Para evaluar las cinéticas de reacción se hicieron las siguientes consideraciones para simplificar el estudio. El análisis de llevó a cabo con una relación molar 6:1 (metanol – aceite), a una temperatura de 50°C y utilizando como catalizar una concentración de 0.2% en peso de hidróxido de sodio (NaOH). Con el objetivo de obtener un aceite adecuado con la mayor capacidad de conversión a biodiésel e implementarlo a futuro a un estudio de forma experimental. En la **figura 2**, se observan los perfiles de concentración de cada uno de los componentes para la obtención de biodiésel a partir del aceite de jatrofa, se puede observar que la reacción ocurre rápidamente entre el triglicérido y el alcohol, siendo aproximadamente al minuto 15 cuando la formación de biodiésel llega una fase estacionaria, esto se debe a que en la fase transitoria la formación de diglicéridos es constante, dando lugar a una mayor producción de monoglicéridos, los cuales facilitan la conversión a biodiésel y glicerina (Berchmans et al., 2010). La producción máxima de concentración de biodiésel fue de 0.9993 mol/L para un tiempo máximo de 20 minutos.

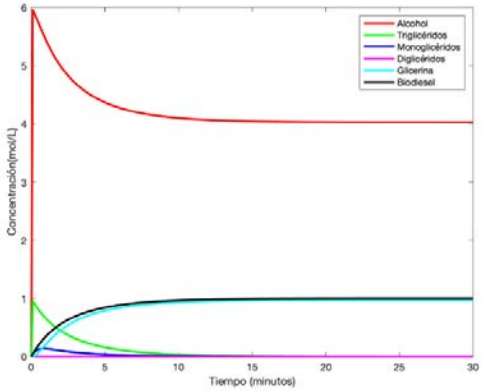


Figura 2. Perfil de concentraciones de los componentes en la transesterificación del aceite de jatrofa.

Para la **figura 3** se consideró la reacción de los triglicéridos del aceite de palma, se muestra un perfil progresivo en los primeros 20 minutos de la reacción con una concentración de biodiésel de 0.985 mol/L, dos minutos después (22 min) la producción de biodiésel tiende a ser constante. También, para este tipo de aceite puede observarse que la concentración de glicerina fue de 0.75 mol/L, menor a la de los otros dos aceites y la concentración de los monoglicéridos (máxima de 0.25 mol/L) decrece hasta el minuto 15 a una concentración de casi 0 mol/L, este comportamiento es característico en el proceso de transesterificación debido a que existen reacciones reversibles durante la formación de los metil éster (Narváez et al., 2007). La obtención máxima de la concentración de biodiésel fue de 0.9965 mol/L para un tiempo de 25 minutos.

ISSN: 2992-8338

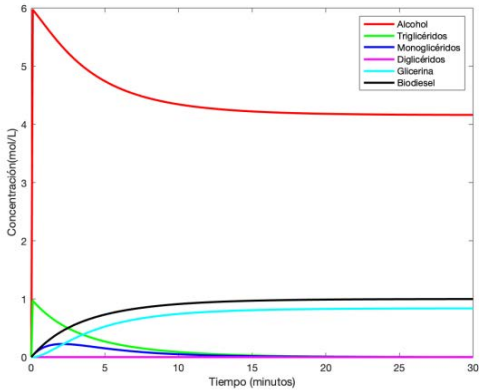


Figura 3. Perfil de concentraciones de los componentes en la transesterificación del aceite de palma.

La **figura 4**, muestra el comportamiento de la concentración de los productos y reactivos utilizando aceite de soya, los resultados obtenidos son muy similares a los observados en el aceite de palma. La reacción entre los triglicéridos y el alcohol se detiene a los primeros 22 minutos y es hasta el minuto 25 cuando el comportamiento se vuelve constante. La concentración de glicerol es de 0.805 mol/L, ligeramente superior a la del aceite de palma y menor a la de jatrofa. Hay reportes en literatura que señalan que concentraciones bajas de glicerol se pueden incrementar las conversiones de biodiésel con una mayor calidad del producto, debido a que se forman mayores concentraciones de subproductos como los monoglicéridos que son los precursores directores a la formación de biodiésel (Noureddini et al., 1997). La concentración de biodiésel para este tipo d aceite fue de 0.9957 mol/L.

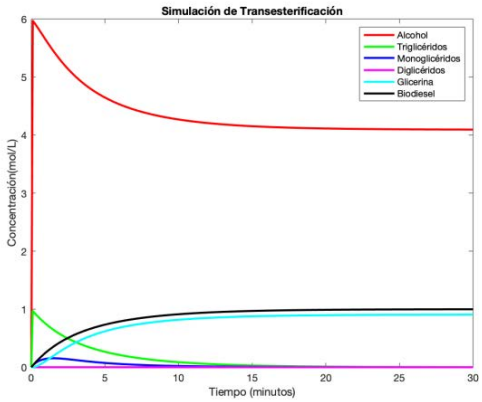


Figura 4. Perfil de concentraciones de los componentes en la transesterificación del aceite de soya.

La **figura 5** presenta los tres escenarios de la concentración de la producción de biodiésel de los 3 aceites evaluados. Donde, se observó que el aceite de jatrofa es de menor tiempo y conversión a biodiésel tuvo en comparación con los otros dos aceites, después de un perfil transitorio de 15 min la concentración suele ser constante de 0.9993 mol/L, mientras que en el mismo tiempo el aceite de palma tiene apenas una concentración de 0.9658 mol/L y 0.9599 mol/L para el aceite de soya, siendo estos dos últimos aceites que siguen formando subproductos, los cuales tardan hasta 10 minutos más en llegar a una producción estable de biodiésel. Este bajo rendimiento es ocasionado posiblemente por la composición natural de las propiedades de los aceites y por la formación de subproductos, además que el efecto de la concentración del alcohol influye definitivamente (Richard et al., 2013).

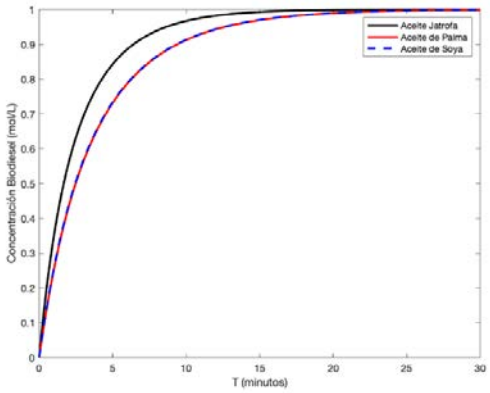


Figura 5. Perfil de concentraciones de la producción de biodiésel

El análisis de este estudio está limitado a una sola temperatura, ya que se ha demostrado que en un rango de temperaturas de 50 a 60°C es el óptimo de conversión a biodiésel, aunque la mayoría de los estudios en literatura reportan que no hay una mayor conversión de biodiésel significativa, pero si puede lograr acortar los tiempos de producción a biodiésel y mejorar la calidad del producto. Como se puede observar las simulaciones se acoplaron a los datos experimentales obtenidos en literatura con los diversos tipos de aceites para predecir los perfiles de concentraciones de los componentes.

4. CONCLUSIONES

Un análisis de la producción de biodiésel fue simulado por medio del modelo de la cinética de reacción por transesterificación a partir de aceites vegetales; jatrofa, palma y soya. El estudio se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones: una relación molar 6:1 alcohol-aceite, a una temperatura de 50°C y un catalizador al 0.2% en peso de NaOH. Los resultados de la simulación del modelo mostraron que la formación de biodiésel esta mayormente influenciada por la concentración de acilglicéridos contenidos en el aceite. Siendo el aceite de palma el que mayor conversión a biodiésel y de buena calidad puede producir, ya que la concentración de glicerina es de 0.75 mol/L, menor a la obtenida por el aceite de jatrofa y soya de 0.9895 y 0.8075 mol/L respectivamente. Ya que el aceite de palma como materia prima forma mayor cantidad de monoglicéridos durante el proceso de transesterificacion, lo que ocasiona una mayor conversión a biodiesel y bajas concentraciones de glicerol (González-Castillo et al., 2018). El parámetro significativo a considerar para este estudio es la mayor concentración de producción de biodiésel, y el aceite que mejores resultados obtuvo fue el

ISSN: 2992-8338

aceite de jatrofa, que durante los primeros 15 minutos de la reacción se obtiene hasta un 0.9993 mol/L, mientras que el aceite de palma y soya es de 0.9658 mol/L y 0.9599 mol/L respectivamente. Por lo tanto, al utilizar este estudio y evaluarlo en un reactor tubular continuo (RTC) permitirá una mayor conversión de biodiésel en menor tiempo (Farobie et al., 2014), compuesto que nos interesa producir, así mismo, puede ser una referencia a considerar la calidad del producto para tomarse en cuenta a la hora de implementar este estudio en la etapa experimental

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONAHCyT y al Tecnológico Nacional de México y CENIDET por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. A. Acevedo-Quiroz agradece a CONAHCyT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías) por el apoyo financiero brindado durante su período de posdoctorado.

REFERENCES

Adokiye, T., Gunorubon, A. J., & Kenkugile, D. K. (2020). Modeling and Control of a Biodiesel Transesterification Reactor. Advances in Chemical Engineering and Science, 10(03), 210–224. https://doi.org/10.4236/aces.2020.103016

Ataya, F., Dubé, M.A., Ternan, M., 2008. Transesterification of canola oil to fatty acid methyl ester (FAME) in a continuous flow liquid–liquid packed bed reactor. Energy Fuels 22, 3551–3556.

Berchmans, H. J., Morishita, k. and Takarada, T., (2010). Kinetic Study of Methanolysis of Jatropha Curcas-Waste Food Oil Mixture. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 43, No. 8, pp. 661–670.

Brásio, A. S. R., Romanenko, A., Leal, J., Santos, L. O., & Fernandes, N. C. P. (2013). Nonlinear model predictive control of biodiesel production via transesterification of used vegetable oils. Journal of Process Control, 23(10), 1471–1479. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.09.023

Fonseca, F. A. S., Vidal-Vieira J. A. and Ravagnani, S. P., (2010). Transesterification of vegetable oils: Simulating the replacement of batch reactors with continuous reactors. Bioresource Technology 101, 8151–8157.

Castillo González, J. P., Medina, M. A., Álvarez Gutiérrez, P. E., López Zapata, B. Y., & Lagunas Rivera, S. (2017). Predictive control of biodiesel transesterification in a batch reactor. Revista Mexicana de Ingeniera Quimica, 16(2), 651–661.

El-Galad, M.I., El-Khatib, K.M., Zaher, F.A., 2015. Economic feasi-bility study of biodiesel production by direct esterification of fatty acids from the oil and soap industrial sector. Egypt. J. Pet. 24, 455–460. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.002

Liu, X., Wang, D., & Li, A. (2021). Biodiesel production of Rhodosporidium toruloides using different carbon sources of sugar-containing wastewater: Experimental analysis and model verification. Journal of Cleaner Production, 323. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129112

Martínez-Sánchez, O., Gómez-Castro, F. I., & Ramírez-Corona, N. (2022). Plantwide control of a biodiesel production process with variable feedstock. Chemical Engineering Research and Design, 185, 377–390.

Narváez, P. C., Rincón, S. M. and Sánchez F. J., (2007). Kinetics of Palm Oil Methanolysis. J Am Oil Chem Soc. 84:971–977 DOI 10.1007/s11746-007-1120-y

Nayab, R., Imran, M., Ramzan, M., Tariq, M., Taj, M. B., Akhtar, M. N., & Iqbal, H. M. N. (2022). Sustainable biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification of feedstock materials – A review. Fuel, 328.

Noureddini, H., Harkey, D., & Medikonduru, V. (1998). A continuous process for the conversion of vegetable oils into methyl esters of fatty acids. JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society, 75(12), 1775–1783. https://doi.org/10.1007/s11746-998-0331-1.

Orege, J. I., Oderinde, O., Kifle, G. A., Ibikunle, A. A., Raheem, S. A., Ejeromedoghene, O., Okeke, E. S., Olukowi, O. M., Orege, O. B., Fagbohun, E. O., Ogundipe, T. O., Avor, E. P., Ajayi, O. O., & Daramola, M. O. (2022). Recent advances in heterogeneous catalysis for green biodiesel production by transesterification. In Energy Conversion and Management (Vol. 258).

Pan, H., Xia, Q., Wang, Y., Shen, Z., Huang, H., Ge, Z., Li, X., He, J., Wang, X., Li, L., & Wang, Y. (2022). Recent advances in biodiesel production using functional carbon materials as acid/base catalysts. In Fuel Processing Technology (Vol. 237). Elsevier B.V.

Racar, M., Faraguna, F., Glasovac, Z., & Jukić, A. (2020). Experimental modeling and optimization of biodiesel production from waste cooking oil and ethanol using N,N″,N″-tris(3-dimethylaminopropyl)-guanidine as catalyst. Renewable Energy, 146, 2374–2379. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.028

Reza Talaghat, M., Mokhtari, S., & Saadat, M. (2020). Modeling and optimization of biodiesel production from microalgae in a batch reactor. Fuel, 280.

Richard, R., Thiebaud-Roux, S. and Prat, L., (2013). Modelling the kinetics of transesterification reaction of sunflower oil with ethanol in microreactors. Chemical Engineering Science 87, 258–269

Sahani, S., Roy, T., & Sharma, Y. C. (2020). Smart waste management of waste cooking oil for large scale high quality biodiesel production using Sr-Ti mixed metal oxide as solid catalyst: Optimization and E-metrics studies. Waste Management, 108, 189–201.

Sun, X., Opulencia, M. J. C., Alexandrovich, T. P., Khan, A., Algarni, M., & Abdelrahman, A. (2022). Modeling and optimization of vegetable oil biodiesel production with heterogeneous nano catalytic process: Multi-layer perceptron, decision regression tree, and K-Nearest Neighbor methods. Environmental Technology and Innovation, 27.

Nomenclatura

[A] Concentración de alcohol (mol)
[DG] Concentración de diglicérido (mol)
E Energía de activación (kJ/mol)
[GL] Concentración de glicerol (mol)
K Constante de velocidad de reacción (L/mol*min)
[MG] Concentración de monoglicérido (mol)
[ME] Concentración de metil éster/biodiésel (mol)
R Constante de los gases ideales (kJ/mol*K)
T Temperatura (°C)
[TG] Concentración de triglicérido (mol)

ISSN: 2992-8338

Maximum Power Point Tracking Techniques (MPPT) in Renewable Energy Systems for Rural Electrification with Hydrokinetic Turbines

Ismael Hernández, * Fher Said Macedo, ** Jaime Arau, Manuel Rico***

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (Cenidet), Cuernavaca, México*

E-mail: {m22ce062, m22ce017, jaime.ar}@cenidet.tecnm.mx

***Universidad de Oviedo, Gijón, España (e-mail: mricosecades@gmail.com)*

Abstract: This paper presented includes a review of maximum power point tracking (MPPT) techniques applied to renewable energy systems for electrification of houses and rural communities, which integrate hydrokinetic microturbines located in irrigation canals. The various control techniques to find the maximum power point and MPPT algorithms, such as the Perturb Wait & Observer, are explored in detail, highlighting their applicability in rural areas. These systems offer sustainable and cost-effective solutions to address energy needs in remote areas, contributing to the development and improvement of the quality of life of rural communities.

Keywords: Renewable energy, Rural communities, Rural electrification, MPPT algorithms, Micro hydrokinetic turbines, Hydropower.

1. INTRODUCCIÓN

En las zonas rurales, donde el acceso a la red eléctrica es limitado o inexistente, la generación de energía a partir de recursos locales renovables, es esencial para abastecer las necesidades de agua, iluminación y otras aplicaciones agrícolas y domésticas En la Fig. 1 se muestra la matriz de generación de energía eléctrica por tipo de tecnología de generación y/o fuente primaria de energía. la tecnología hidroeléctrica, se observa que representa un 14.1 % de la capacidad de generación instalada, siendo un porcentaje muy elevado con respecto a otras fuentes renovables.

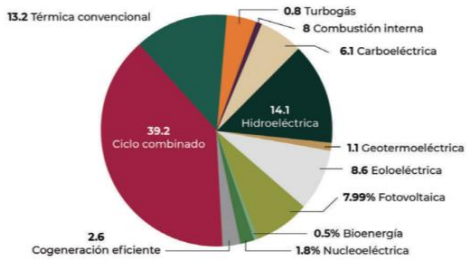


Fig. 1. Tecnología de generación eléctrica instalada en México, año 2022 Oscar Campos, (2022).

1.1 Energía hidráulica.

La tecnología de generación hidráulica se refiere a la extracción de energía cinética de un flujo de agua, para convertir a energía eléctrica, utilizando turbinas hidráulicas. Se puede considerar el caudal de agua en un río de bajo cauce o canal de riego, como una fuente de energía limpia y constante, que tiene el potencial cinético apto para la cosecha de energía hidráulica, mediante turbinas hidrocinéticas. Estas turbinas no dependen de grandes alturas o caídas de agua, lo cual las hace una tecnología de bajo costo y tiempo de implementación, además de presentar un impacto ambiental mínimo Yuce & Muratoglu, (2015).

1.2 Seguimiento del punto de máxima potencia en turbinas hidrocinéticas

Los sistemas de cosecha de energía hidráulica, se han contemplado como una de las formas alternas de generación de energía. Al obtener una potencia eléctrica de dichos sistemas, es necesario contar con un control de la energía extraída y para lograr ese control, se utilizan técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés). Para conseguir el punto de máxima potencia en una turbina hidrocinética, dependerá de la velocidad de rotación de la turbina, que puede verse afectada por diferentes condiciones del caudal de agua. El cómo determinar el MPP es necesario encontrar una corriente de referencia (I_{ref}) para así extraer la máxima potencia, para encontrar la (I_{ref}) se puede hacer de diferentes maneras, midiendo la: frecuencia eléctrica, revoluciones (rpm), midiendo la velocidad del fluido, esto denominados como técnicas de MPPT (Bucle abierto o cuasi-MPPT), pero también podemos encontrar el MPP con algoritmos de búsqueda activa más tradicionales.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El rendimiento mecánico de una turbina hidrocinética a una determinada velocidad del agua depende de la relación de velocidad de las puntas de las palas (TSR por sus siglas en ingles), que se define como la relación entre la velocidad de las puntas del rotor de la turbina y la velocidad del agua. La conversión de energía del agua ocurre en un TSR específico para una velocidad del agua y un ángulo de paso de las palas determinados. Por lo tanto, a medida que la velocidad del agua cambia, la velocidad del rotor de la turbina debe ajustarse en consecuencia para extraer más energía. La ecuación (1) establece la relación entre la potencia obtenida de la turbina hidrocinética y las variables de la turbina Xia et al., (2013).

ISSN: 2992-8338

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A_{tur} \cdot v^3 \quad (1)$$

Donde:

$\rho = Densidad\ el\ agua\ o\ del\ viento;$
$C_p = Coeficiente\ de\ potencia\ de\ la\ turbina;$
$A_{tur} = Área\ de\ la\ turbina;$
$v = Velocidad\ del\ fluido.$

La Figura 2 muestra la variación de la potencia de la turbina hidrocinética para diversas velocidades del agua (fluido en el otro caso) en función de la velocidad del rotor. Se puede observar que, para cada velocidad del agua, existe una velocidad de rotor particular en la que la potencia disponible es máxima. El problema abordado por los diversos métodos MPPT es determinar la velocidad óptima del rotor que corresponde a la velocidad del agua en la que se podría lograr la captura máxima de energía.

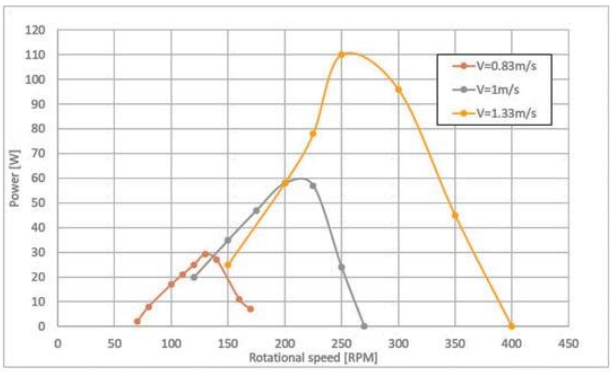


Fig. 2. Curvas de potencia de una turbina hidrocinética a diferentes velocidades del agua Chihaia et al., (2020).

3.TÉCNICAS DE MPPT

Los algoritmos MPPT aplicados a sistemas de energía hidráulica se pueden dividir en diferentes categorías principales: control en bucle abierto (OLC, por sus siglas en ingles), retroalimentación de la señal de potencia (PSF, por sus siglas en ingles) y búsqueda del punto de máxima pendiente (HCS, por sus siglas en ingles). El método de control en bucle abierto consiste en hacer mediciones que puede consistir en medir las revoluciones o la frecuencia eléctrica y también la velocidad el fluido esto para regular la velocidad del rotor de la turbina hidrocinética para mantener una relación de velocidad de puntas óptima. Esto requiere mediciones tanto de la velocidad del agua como de la velocidad del rotor de la turbina. La relación de velocidad de puntas óptima para una velocidad determinada se deriva de las características específicas de la turbina y el generador, y varía de un sistema a otro.

Por otro lado, el control PSF implica conocer la curva de potencia máxima de la turbina hidrocinética, que se obtiene previamente mediante simulaciones o pruebas específicas para cada turbina. La velocidad de referencia se determina en función de esta curva. Tanto el control TSR como el control PSF requieren un conocimiento detallado de la turbina, así como la medición de la velocidad del generador y/o la velocidad del agua, lo que implica un aumento en el número de sensores y en la complejidad del control. Esto hace que la implementación de estos algoritmos sea costosa y complicada.

Para superar estas dificultades, se han propuesto métodos basados en la búsqueda del punto de máxima pendiente (HCS). En estos métodos, el algoritmo busca continuamente la potencia de salida máxima de la turbina al variar la velocidad o el par del generador. Basándose en los cambios en la potencia, se determina la siguiente variación. A lo largo de los años, se han desarrollado numerosas variaciones de estos tres enfoques, utilizando diversas técnicas para abordar sus limitaciones. Un análisis exhaustivo de todas estas variantes ha llevado a la clasificación de los algoritmos MPPT en cinco categorías diferentes, como se ilustra en la Figura 3.

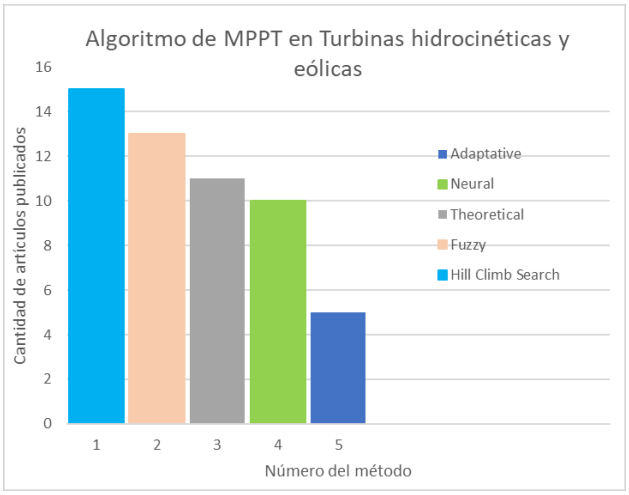


Fig. 3. Categorización de algoritmos MPPT

Es importante destacar que la clasificación previa se basó en la metodología empleada para generar la señal de referencia (corriente) y la técnica utilizada en sistemas de cosecha de energía con turbinas. La distinción entre muchos de los algoritmos propuestos radica en factores como el número y tipo de sensores utilizados, el método de generación de señales de referencia, la velocidad de convergencia, la complejidad, la adaptación a diferentes velocidades del agua, entre otros. También es relevante mencionar que varios estudios han propuesto la combinación de diversas técnicas con el fin de lograr un seguimiento óptimo de la potencia máxima.

3.1. Retroalimentación de la señal (PSF)

En varios estudios Chinchilla et al., (2006; Ermis et al., (1992); Koutroulis & Kalaitzakis, (2006); Moor & Beukes, (2004); Solero et al., (1996); Thiringer & Linders, (1993); Yaoqin et al., (2002), se enfocan en vincular la velocidad y la visualización de la turbina para así obtener que es especialmente preciso para cambios en la velocidad. En Brune et al., (1993) se respalda la excelente correlación entre la potencia y la velocidad del fluido, la cual se deriva de la velocidad de las puntas del rotor, explicada en una tabla de referencia que utiliza la potencia eléctrica y, por ende, la velocidad del rotor, contenida en cada punto intermedio de muestra. El estudio Koutroulis & Kalaitzakis, (2006) muestra que la velocidad varía en concordancia con las fluctuaciones

ISSN: 2992-8338

en la velocidad del fluido y se mantiene a una distancia considerable del retardo temporal del convertidor eléctrico, ya que el algoritmo está sincronizado con la velocidad de rotación del generador. En ambos casos Chinchilla et al., (2006); Ermis et al., (1992) se emplea la velocidad del eje ideal en contraste con la velocidad del fluido certificada, según lo proporcionado por los datos del fabricante de la turbina, para calcular el rendimiento de potencia de referencia.

3.2. Algoritmo P&O y HCS

En esta sección se presentan los algoritmos "Perturbar y Observar" y "Búsqueda Ascendente en Colina" (P&O y HCS por sus siglas en inglés). Estos algoritmos se exponen conjuntamente debido a su similitud en el principio de operación.
En este enfoque (HCS) Brune et al., (1993); Das et al., (2005); Datta et al., (2002); Esmaili et al., (2005); Oghafy & Nikkhajoei, (2008); Schiemenz & Stiebler, (2001); Srighakollapu & Sensarma, (2008); Tafticht et al., (2006) se incorpora la perturbación de la corriente del generador, la velocidad del rotor del generador, la tensión y el cambio en la potencia en el proceso. Según se aprecia en la Figura 2, si la velocidad del generador aumenta o disminuye, la operación se desplaza hacia la izquierda del punto de máxima potencia (MPPT). Si la operación se desplaza hacia la izquierda, entonces la perturbación debe mantenerse constante, y si se desplaza hacia la derecha, la perturbación de la potencia debe invertirse hasta que se alcance el MPPT.
En la práctica, el ajuste de la frecuencia terminal del generador aumenta o disminuye gradualmente. En esta situación, el cambio en la potencia y el cambio en la frecuencia son iguales, lo que lleva al sistema hacia el punto de máxima potencia. El punto de máxima potencia se logra cuando la relación entre el cambio en la potencia y el cambio en la frecuencia es igual a cero. Si la frecuencia aumenta o disminuye, se obtienen cambios en la dirección de la frecuencia y la relación entre el cambio de potencia y el cambio de frecuencia, lo que indica un cambio en la dirección de la frecuencia.

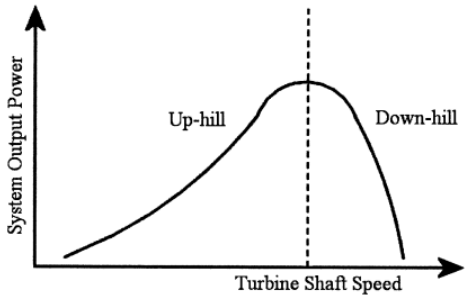


Fig. 4. Principio del control de búsqueda de ascenso Patel et al., (2015).

El método P&O opera con pocos incrementos y disminuciones de perturbación, el cual asegura una transición suave sin excederse ni quedarse corto en la velocidad. Además, contribuye a mantener el funcionamiento dentro de la región de operación estable de la máquina de generación.

En un sistema HCS modificado Farzia Karim et al., (2011), Kazmi et al., (2011), Correa et al., (2013), Nateghi et al., (2014) Amin & Uddin, (2017), se utiliza la velocidad del generador como la señal de perturbación y se establecen criterios para la toma de decisiones respecto a la repetición y el tamaño del paso de integración, con el objetivo de mantenerse dentro de los límites de inercia del proceso. En cuanto a la calibración de las constantes necesarias, esta suele llevarse a cabo en gran medida en función del rango de funcionamiento de la unidad.

Por otra parte en Dalala et al., (2013); Dessouky et al., (2018); Ker et al., (2012); Venkatesan et al., (2016), se revisa algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para sistemas de energía eólica e hidrocinética, clasificándolos según la presencia o ausencia de sensores y las técnicas utilizadas para localizar el punto máximo. Se realiza una comparación de diferentes algoritmos de MPPT en términos de respuestas de velocidad y capacidad para lograr el máximo rendimiento energético. Según los resultados de simulación, el control de par óptimo (OTC) se considera el mejor método de MPPT debido a su simplicidad, mientras que el método de perturbación y observación (P&O) es flexible pero menos eficiente.

En los trabajos Heshmatian et al., (2018), Taghdisi & Balochian, (2020), Ibrahim Wan Ismail et al., (2020), se propone un algoritmo híbrido de MPPT que combina los métodos convencionales como lo son: relación punta-velocidad (TSR), realimentación de la señal de potencia, control óptimo del par motor (OTC) y búsqueda ascendente en colina, (HCS), para mejorar el seguimiento del punto de máxima potencia. El algoritmo antes mencionado es más rápido y preciso, y presenta un buen rendimiento en condiciones con variaciones intensas de velocidad del fluido. Se realizan comparaciones de desempeño utilizando simulaciones en un sistema de conversión de energía eólica con generador síncrono de imán permanente (PMSG), y se encuentra que el algoritmo propuesto tiene ventajas notables sobre los métodos convencionales.

3.4. Técnica en bucle abierto (OLC)

En el artículo Yin et al., (2017) se centra en el desarrollo del control de par óptimo (OT), que es un método comúnmente utilizado para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Se mejora el control OT convencional para aumentar la eficiencia del MPPT mediante la modificación dinámica de la curva de par del generador en función de la velocidad del rotor. Se propone un rango de seguimiento efectivo (ETR) que corresponde al intervalo local de velocidad del fluido con una distribución concentrada de energía eólica, lo que permite lograr una mayor eficiencia de MPPT bajo condiciones de fluido variables.

En Alvarez Alvarez et al., (2018) estrategia de control se define mediante una serie de ecuaciones y regiones de control que determinan los diferentes valores de corriente continua a ajustar. Estos valores dependen de la frecuencia eléctrica medida. Las ecuaciones utilizadas incluyen una correlación

ISSN: 2992-8338

entre la velocidad del agua y la frecuencia eléctrica, la representación de la potencia hidráulica máxima en el Punto de Máxima Potencia (MPP) como función de la frecuencia eléctrica del PMG y la representación de la potencia eléctrica como función de la frecuencia eléctrica y la corriente generada.

3.5. Redes Neuronales

Las redes neuronales (NN por sus siglas en inglés) se han vuelto equiparables a los controladores de lógica difusa (FLC por sus siglas en inglés) y la ingeniería de microcontroladores avanzada, lo que ha permitido un avance significativo en la ingeniería al proporcionar soluciones más flexibles y eficientes para una amplia variedad de aplicaciones de control y procesamiento de datos. Eskander, (2002); Kelouwani & Agbossou, (2004); Ro & Choi, (2005); Xin-yan et al., (2005). Una red neuronal consta de tres capas: la de entrada, la capa oculta y la capa de salida, y así se establece la conexión en cada transición entre capas.
En primer lugar, las variables de entrada incluyen la velocidad del flujo, el ángulo de paso, la velocidad del rotor, el par de salida, la tensión terminal, entre otras. Estas variables se utilizan principalmente como señales de referencia, como el ciclo de trabajo, la velocidad del rotor, el par, etc., para ajustar el convertidor de acuerdo con el Punto de Máxima Potencia (MPPT).

El logro de un funcionamiento más cercano al MPPT depende de los pesos asignados a la capa oculta y del entrenamiento proporcionado al sistema neural para un conjunto específico de entradas de rendimiento. Esto varía según el diseño del sistema y las características de rendimiento de entrada seleccionadas Wei et al., (2016).

3.6. Control lógico difuso

Los numerosos métodos de control Abo-Khalil et al., (2004); Galdi et al., (2008); Mohamed et al., (2001); R.M. Hilloowala & A.M. Sharaf, s/f; Z. Chen et al., (2000), utilizan el Control Lógico Difuso (FLC por sus siglas en inglés) para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT). El control lógico difuso consta de tres etapas: la "fuzzificación", la tabla de búsqueda de directrices y la "defuzzificación". Para comenzar con la "fuzzificación", las variables de la región de datos de la unidad se transforman en variables lingüísticas de rendimiento.
En la tercera etapa de "defuzzificación", el FLC se convierte de una variable semántica a una variable numérica mediante una función diferente. En un sistema que utiliza tres FLCs (R.M. Hilloowala & A.M. Sharaf, s/f), el FLC principal se utiliza para ajustar la velocidad del generador y simularla para una velocidad del viento particular con el fin de maximizar la potencia. En este caso, el segundo FLC se emplea cuando se alcanza la máxima potencia del convertidor para aumentar la potencia del generador reduciendo la velocidad del rotor.
El tercer FLC se utiliza para transformar la velocidad inversa sostenida y el par motor periódico divergente. Las entradas en este caso son la potencia del generador y la producción de par, y se utilizan como variables de entrada con funciones de membresía triangulares y tablas de base de 7 niveles. A pesar de que la gestión es altamente compleja, la simulación se lleva a cabo en un entorno de cálculo de doble precisión de alta velocidad, con memoria plana, tolerancia y capacidad de carga.

3.7. Técnicas MPPT basadas en teoría

Muy pocos métodos de control han logrado establecer una relación avanzada entre las variables de control para maximizar la potencia en las turbinas hidrocinéticas. En Amei et al., (2002), el control del generador se enfocó en la producción de voltaje de corriente continua, y se interconectaron factores como el grado de llamada del picador de asistencia y la repetición del movimiento del generador. Un grado de llamada ideal se estableció como referencia para lograr la máxima potencia, inicialmente combinando la articulación adquirida con un grado de aplicabilidad responsable.

En Hui Li et al., (2004); Morimoto et al., (2003); Venkataramanan et al., (1996), se estableció una asociación precisa entre los voltajes de corriente continua, la frecuencia eléctrica calculada y la relación de velocidad de las puntas, todo basado en información verificada por los fabricantes. El documento incluso sugiere una restricción en la gestión para aumentar la potencia de corriente una vez que se alcanza el punto óptimo.

4. CONCLUSIONES

La optimización del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) es esencial tanto en sistemas de generación de energía eólica como en sistemas de turbinas hidrocinéticas. En el caso de la generación eólica, se emplean algoritmos MPPT específicos para maximizar la eficiencia de la cosecha de energía. Estos algoritmos, como Perturbar y Observar (P&O) y Conductancia Incremental (INC), se adaptan a las condiciones cambiantes del viento y permiten una gestión eficiente de la turbina. En sistemas hidrocinéticos, especialmente en aplicaciones de baja potencia para comunidades rurales, se requieren soluciones de bajo costo y complejidad. Es importante destacar que estos sistemas son particularmente interesantes para la electrificación de hogares y comunidades rurales, donde es fundamental contar con soluciones asequibles y fáciles de implementar.

La Tabla 1 que se muestra a continuación resume las características clave de los algoritmos MPPT revisados en este artículo. Estas estrategias, son examinadas y comparadas, lo que arroja una comparativa sobre sus ventajas y limitaciones en la optimización del rendimiento de las turbinas.

Tabla 1

Técnica	Complejidad	Convergencia velocidad	Memoria y Requerimiento	Medición de la velocidad del fluido
Hill Climb Search	Simple	Dependiente	No requiere	No se mide
Theoretical	Simple	Rápido	No requiere	No se mide
Fuzzy logic	Alta	Rápido	Alta	Depende
Neural	Alta	Rápido	Alta	Depende
Adaptative	Alta	Medio	Alta	Depende

ISSN: 2992-8338

Finalmente, se puede asegurar que la investigación en algoritmos MPPT para turbinas hidrocinéticas es aún incipiente en relación a otras aplicaciones como los sistemas fotovoltaicos y eólicos. Este tipo de sistemas se perfilan como una alternativa muy prometedora para satisfacer las necesidades energéticas de áreas remotas con recursos limitados, pero con acceso a rìos de bajo cauce o canales de riego.

REFERENCIAS

Abo-Khalil, A. G., Lee, D.-C., & Seok, J.-K. (2004). Variable speed wind power generation system based on fuzzy logic control for maximum output power tracking. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, *3*, 2039–2043. https://doi.org/10.1109/pesc.2004.1355431

Alvarez Alvarez, E., Rico-Secades, M., Corominas, E. L., Huerta-Medina, N., & Soler Guitart, J. (2018). Design and control strategies for a modular hydroKinetic smart grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *95*, 137–145. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.019

Amei, K., Takayasu, Y., Ohji, T., Ohji, T., & Sakui, M. (2002). A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit. *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579)*, *3*, 1447–1452. https://doi.org/10.1109/pcc.2002.998186

Amin, I. K., & Uddin, M. N. (2017). MPPT based efficiently controlled DFIG for wind energy conversion system. *International Electric Machines and Drives Conference*, 1–6. https://doi.org/10.1109/iemdc.2017.8002274

Brune, C. S., Spee, R., & Wallace, A. K. (1993). Experimental evaluation of a variable-speed, doubly-fed wind-power generation system. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, *30*(3), 648–655. https://doi.org/10.1109/ias.1993.298967

Chihaia, R.-A., Vasile, I., Cîrciumaru, G., Nicolaie, S., Tudor, E., & Dumitru, C. (2020). Improving the Energy Conversion Efficiency for Hydrokinetic Turbines Using MPPT Controller. *Applied Sciences*, *10*(21), 7560. https://doi.org/10.3390/app10217560

Chinchilla, M., Arnaltes, S., J.C. Burgos, & Burgos, J. C. (2006). Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *21*(1), 130–135. https://doi.org/10.1109/tec.2005.853735

Correa, L. C., Lenz, J. M., Ribeiro, C. G., Trapp, J. G., & Farret, F. A. (2013). MPPT for Magnus wind turbines based on cylinders rotation speed. *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 462–467. https://doi.org/10.1109/cobep.2013.6785156

Dalala, Z., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y., & Lai, J.-S. (2013). Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *28*(3), 756–767. https://doi.org/10.1109/tec.2013.2259627

Das, D., Das, D., Esmaili, R., Xu, L., & Nichols, D. K. (2005). An optimal design of a grid connected hybrid wind/photovoltaic/fuel cell system for distributed energy production. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.* https://doi.org/10.1109/iecon.2005.1569298

Datta, R., V. T. Ranganathan, & Ranganathan, V. T. (2002). A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system. *IEEE Power & Energy Magazine*, *22*(10), 57–57. https://doi.org/10.1109/mper.2002.4311736

Dessouky, S. S., Abdellatif, W. S. E., Abdelwahab, S. A. M., & Ali, M. A. (2018). Maximum Power Point Tracking Achieved of DFIG-Based Wind Turbines Using Perturb and Observant Method. *International Middle East Power Systems Conference*. https://doi.org/10.1109/mepcon.2018.8635206

Ermis, M., Ertan, H. B., Akpinar, E., & Ulgut, F. (1992). *Autonomous wind energy conversion system with a simple controller for maximum-power transfer*. *139*(5), 421–428. https://doi.org/10.1049/ip-b.1992.0052

Eskander, M. N. (2002). Neural network controller for a permanent magnet generator applied in a wind energy conversion system. *Renewable Energy*, *26*(3), 463–477. https://doi.org/10.1016/s0960-1481(01)00140-9

Esmaili, R., Xu, L., & Nichols, D. K. (2005). A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2090–2095. https://doi.org/10.1109/pes.2005.1489319

Farzia Karim, Md. Faruk Hossain, & Md Shahabul Alam. (2011). *MODIFIED HILL CLIMB SEARCHING METHOD FOR TRACKING MAXIMUM POWER POINT IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS*.

Galdi, V., Galdi, V., Piccolo, A., & Siano, P. (2008). Designing an Adaptive Fuzzy Controller for Maximum Wind Energy Extraction. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *23*(2), 559–569. https://doi.org/10.1109/tec.2007.914164

Heshmatian, S., Khaburi, D. A., Khosravi, M., & Kazemi, A. (2018). Development and Analysis of a Novel Multi-Mode MPPT Technique with Fast and Efficient Performance for PMSG-Based Wind Energy Conversion Systems. *iranian journal of electrical and electronic engineering*, *14*(1), 37–48. https://doi.org/10.22068/ijeee.14.1.37

Hui Li, P. McLaren, & K. Shi. (2004). Neural network based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient. *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.* https://doi.org/10.1109/tia.2005.858282

Ibrahim Wan Ismail, W. I. Ibrahim, Mohd Rusllim Mohamed, Raja Mohd Taufika, Raja Ismail Raja Mohd Taufika, M. R. Mohamed, R.M.T. Raja Ismail, Mohamed Mohd Rusllim, R. M. T. R. Ismail, & Mohamed Mohd Rusllim. (2020). *Direct Power Control Method of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for Pico-Hydrokinetic River Energy Conversion System.*

Kazmi, S. M. R., Goto, H., Guo, H.-J., Guo, H.-J., & Ichinokura, O. (2011). A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed-Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(1), 29–36. https://doi.org/10.1109/tie.2010.2044732

Kelouwani, S., & Agbossou, K. (2004). Nonlinear model identification of wind turbine with a neural network. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *19*(3), 607–612. https://doi.org/10.1109/tec.2004.827715

Ker, P. J., Abdullah, M. A., Yatim, A. H. M., Tan, C. W., & Saidur, R. (2012). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *16*(5), 3220–3227. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.016

ISSN: 2992-8338

Koutroulis, E., & Kalaitzakis, K. (2006). Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *53*(2), 486–494. https://doi.org/10.1109/tie.2006.870658

Mohamed, A. Z., Eskander, M. N., & Ghali, F. M. A. (2001). Fuzzy logic control based maximum power tracking of a wind energy system. *Renewable Energy*, *23*(2), 235–245. https://doi.org/10.1016/s0960-1481(00)00099-9

Moor, G. D., & Beukes, H. J. (2004). Maximum power point trackers for wind turbines. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, *3*, 2044–2049. https://doi.org/10.1109/pesc.2004.1355432

Morimoto, S., Nakamura, T., & Takeda, Y. (2003). Power Maximization Control of Variable Speed Wind Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator. *Ieej Transactions on Power and Energy*, *123*(12), 1573–1579. https://doi.org/10.1541/ieejpes.123.1573

Nateghi, A. reza, Karegar, H. K., Bagheri, S., Shahriar Bagheri, & Shahriar Bagheri. (2014). Maximum power point tracking of permanent magnet wind turbines equipped with direct matrix converter. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *6*(5), 053123. https://doi.org/10.1063/1.4898365

Oghafy, V., & Nikkhajoei, H. (2008). Maximum power extraction for a wind-turbine generator with no wind speed sensor. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1–6. https://doi.org/10.1109/pes.2008.4596148

Oscar Campos. (2022, noviembre 13). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021 a 2035.*

Patel, V., Kumar, A., Chatterje, K., & Patel, V. (2015). *A review: Maximum power extraction method in wind turbine system using different algorithm.* 1–6. https://doi.org/10.1109/eesco.2015.7254013

R.M. Hilloowala & A.M. Sharaf. (s/f). A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*. https://doi.org/10.1109/ias.1993.299150

Ro, K.-S., & Choi, H. (2005). Application of neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine system. *Electrical Engineering*, *88*(1), 45–53. https://doi.org/10.1007/s00202-004-0254-2

Schiemenz, I., & Stiebler, M. (2001). Control of a permanent magnet synchronous generator used in a variable speed wind energy system. *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485)*, 872–877. https://doi.org/10.1109/iemdc.2001.939422

Solero, L., Caricchi, F., Caricchi, F., Crescimbini, F., O. Honorati, O. Honorati, Honorati, O., & Mezzetti, F. (1996). Performance of a 10 kW power electronic interface for combined wind/PV isolated generating systems. *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, *2*, 1027–1032. https://doi.org/10.1109/pesc.1996.548708

Srighakollapu, N., & Sensarma, P. (2008). Sensorless maximum power point tracking control in wind energy generation using permanent magnet synchronous generator. *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2225–2230. https://doi.org/10.1109/iecon.2008.4758302

Tafticht, T., Agbossou, K., & Cheriti, A. (2006). DC bus control of variable speed wind turbine using a buck-boost converter. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. https://doi.org/10.1109/pes.2006.1709469

Taghdisi, M., & Balochian, S. (2020). Maximum Power Point Tracking of Variable-Speed Wind Turbines Using Self-Tuning Fuzzy PID. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, *5*(1), 1–8. https://doi.org/10.1007/s40866-020-00087-3

Thiringer, T., & Linders, J. (1993). Control by variable rotor speed of a fixed-pitch wind turbine operating in a wide speed range. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *8*(3), 520–526. https://doi.org/10.1109/60.257068

Venkataramanan, G., Milkovska, B., Gerez, V., & Nehrir, H. (1996). Variable Speed Operation of Permanent Magnet Alternator Wind Turbines Using a Single Switch Power Converter. *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The Asme*, *118*(4), 235–238. https://doi.org/10.1115/1.2871784

Venkatesan, P., Venkatesan, P., & Kumar, S. S. (2016). *Design and Implementation Wind Power Using Hill Climbing Mppt Algorithm*.

Wei, C., Zhang, Z., Qiao, W., & Qu, L. (2016). An Adaptive Network-Based Reinforcement Learning Method for MPPT Control of PMSG Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *31*(11), 7837–7848. https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2514370

Xia, Y., Ahmed, K., & Williams, B. W. (2013). Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *60*(3), 1122–1132. https://doi.org/10.1109/tie.2012.2206332

Xin-yan, Z., Wei-qing, W., & Jing, C. (2005). Analysis on the Control of Variable Speed Wind Turbine Using Neural Network Controller. *Journal of Chongqing University*, *11*, 65–68.

Yaoqin, J., zhongqing, Y., & Binggang, C. (2002). A new maximum power point tracking control scheme for wind generation. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, *1*, 144–148. https://doi.org/10.1109/icpst.2002.1053521

Yin, M., Yin, M., Yin, M., Weijie Li, Weijie, L., Chung, C. Y., Zhou, L., Lianjun Zhou, Chen, Z., Zaiyu Chen, Chen, Z., Zou, Y., & Zou, Y. (2017). Optimal torque control based on effective tracking range for maximum power point tracking of wind turbines under varying wind conditions. *Iet Renewable Power Generation*, *11*(4), 501–510. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0635

Yuce, M. I., & Muratoglu, A. (2015). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *43*, 72–82. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037

Z. Chen, Chen, Z., Chen, Z., Gomez, S. A., M. McCormick, McCormick, M., & McCormick, M. (2000). *A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems.* 114–119. https://doi.org/10.1049/cp:20000230

ISSN: 2992-8338

Energy consumption and microalgal biomass production in a pilot-scale photobioreactor growing *Nannochloropsis Oculata.*

Valenzuela Páez Jesús Gonzalo[*], Arenas Robles Jonathan[*], Adam Medina Manuel[*], Franco Nava Miguel Ángel[**], Gerardo Vicente Guerrero Ramírez[*], Guevara Peredia Oscar Jesús[**], Franco Ortega Juan Carlos[**]

** TECNM/CENIDET, Departamento de ingeniería electrónica, Cuernavaca Morelos, México.*

*** TECNM, Instituto Tecnológico de Mazatlán, Mazatlán Sinaloa, México.*

Abstract: Photobioreactors are devices that promote the production of microalgal biomass in a determined and controlled environment through the regulation of the essential variables of microalgae growth, temperature, lighting, aeration, pH and salinity. However, these devices face significant challenges of low energy efficiency that prevent industrial-scale deployment. The present work focuses on the study of the energy consumption and the production of microalgal biomass of a photobioreactor, finding that the thermal system, in addition to being indispensable for microalgal growth, is also the one with the highest energy consumption, as well as an area of opportunity in the reduction of electrical consumption through new control strategies to contribute positively to the efficiency of the photobioreactor.

Keywords: Photobioreactor, biofuels, energy consumption, microalgal biomass, thermal control.

1.- INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de la necesidad social a nivel global ha llevado a un crecimiento paralelo de la industria y con ello al aumento del consumo energético. Lo anterior, supone contar con fuentes alternas de energía que abastezcan la demanda energética de manera limpia y con recursos energéticos ilimitados (Sukacova, 2021). Los fotobiorreactores son sistemas destinados a la producción de biomasa microalgal para fines energéticos (biocombustibles), alimenticios e incluso farmacéuticos, emplean técnicas de cultivo efectivas auxiliadas por el monitoreo y la regulación de las condiciones óptimas de las variables esenciales en el medio de cultivo para la microalga (temperatura, iluminación, aireación, pH y salinidad) (Huang, 2017). La producción biomasa microalgal en fotobiorreactores depende de las variables de crecimiento de la microalga. Los cambios ambientales de temperatura generan una variación en la síntesis de carbohidratos y proteínas de las células, por lo que es necesario mantener el medio de cultivo a una temperatura óptima constante (Torzillo). El suministro de luz es el principal nutriente de las células fotosintéticas para la generación de nueva biomasa (Jiménez, 2017; Bastida, 2020), sin embargo, los sistemas de iluminación sumergidos aumentan la generación de calor tanto en el sistema como en el medio de cultivo (Jiménez, 2017). Existen gradientes de luz debido a la atenuación provocada por la concentración de células, como consecuencia, las células están expuestas a áreas iluminadas y oscuras, por lo que es necesaria la mezcla por aireación del medio de cultivo, la cual mueve las células entre las zonas claras y opacas generando un efecto intermitente de luz, reduciendo la fotoinhibición al mantener una mezcla homogénea, además de ayudar en la transferencia de masa para realizar el intercambio de gases (Salguero, 2020). Durante la fotosíntesis se produce oxígeno, alcalinizando el medio de cultivo y por ende aumentando su pH, una de las técnicas empleadas para reducirlo es acidificando a través de la disolución de dióxido de carbono en el medio de cultivo. La salinidad se incrementa cuando el nivel del líquido se ve afectado por el fenómeno de evaporación, puede ser regulada al inyectar agua destilada al medio de cultivo para mantenerla en un valor de referencia (Jiménez, 2017; Bastida, 2020). El cultivo de microalgas en fotobiorreactores de sistemas cerrados para aplicaciones energéticas se enfrenta a desafíos significativos que impiden una implementación a escala industrial debido a la baja rentabilidad energética (Schmitz, Pilot scale photobioreactor system for land based macroalgae cultivation, 2022). El presente trabajo tiene como objetivo conocer el consumo eléctrico del fotobiorreactor a escala piloto, así como su producción de biomasa utilizando *Nannochloropsis Oculata* con el fin de encontrar un área de oportunidad en el aumento de la eficiencia del fotobiorreactor.

1.1.- Descripción del sistema.

Se representa el diagrama general de control del bioproceso de producción microalgal del fotobiorreactor de estudio (fig.1), donde se identifican los actuadores de los diferentes sistemas, además se incluyen los dispositivos mecánicos y los depósitos auxiliares. Para el control de cada variable del medio de cultivo se tienen sensores conectados a una unidad de control que a su vez gobierna a los actuadores que consumen energía eléctrica en función de su régimen de operación.

2.- METODOLOGÍA

El consumo eléctrico de los fotobiorreactores depende de su diseño, su volumen, las condiciones de operación y la robustez de sus sistemas para satisfacer dichas condiciones. Obtener su consumo eléctrico requiere de aplicar una metodología que permita conocer tanto el consumo eléctrico nominal como el consumo eléctrico real del fotobiorreactor en condiciones reales de operación. La metodología para el consumo eléctrico consiste en tres pasos, la identificación de los actuadores, la obtención de las potencias eléctricas y los tiempos de operación, y la aplicación de las leyes de Watt y Joule (fig.2).

ISSN: 2992-8338

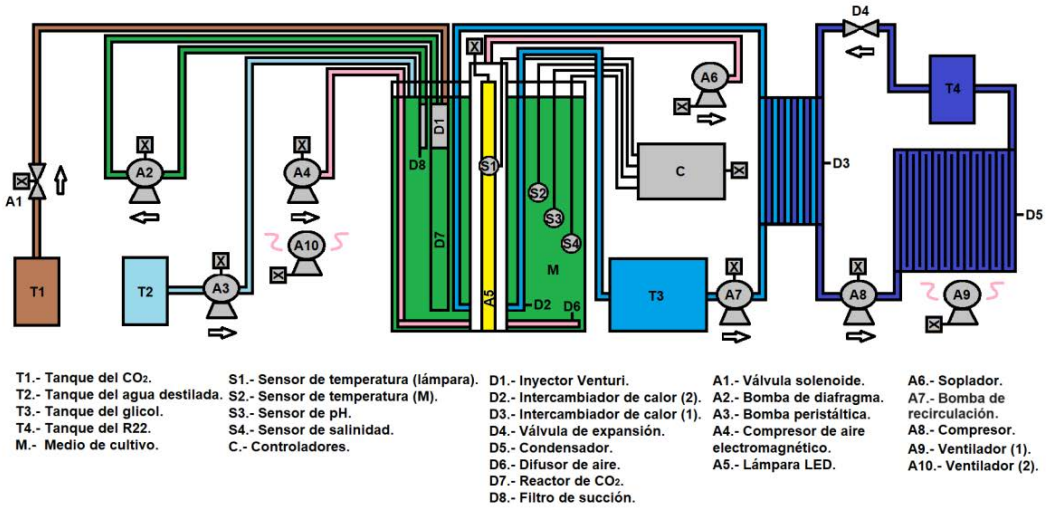


Figura 1.- Diagrama general de control del bioproceso de producción microalgal del fotobiorreactor de estudio.

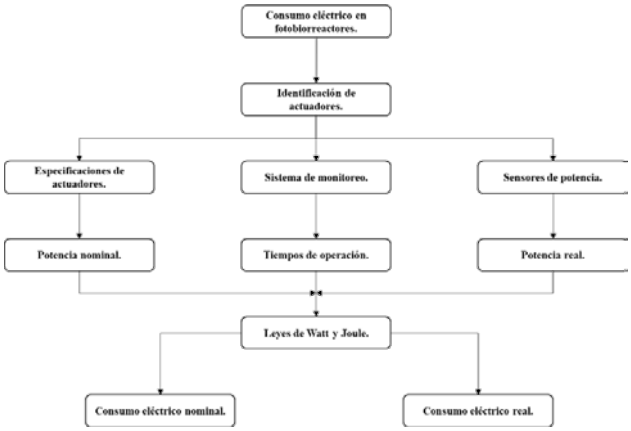


Figura 2.- Metodología para determinar el consumo eléctrico de un fotobiorreactor.

La potencia nominal está sujeta a las hojas de especificaciones otorgadas por el fabricante de cada actuador y regulado por las Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética (NOM-ENER) y la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI) (Schmitz, Pilot scale photobioreactor system for land-based macroalgae cultivation, 2021). La potencia real se obtuvo a través de sensores de potencia certificados (fig.3, fig.4), entre otros. Los tiempos de operación de cada actuador fueron monitoreados y registrados en una interfaz de LabView para cada ronda experimental (Jiménez, 2017; Bastida, 2020).

Figura 3.- HER432.

Figura 4.- PZEM004T.

En el cálculo y la evaluación del consumo eléctrico nominal o real de un sistema es necesario la aplicación de las leyes de Watt y Joule, las cuales dictan que la energía es la integral de la potencia respecto el tiempo (1).

$$E = \int P\, dt \tag{1}$$

donde:

- E es la energía.
- $\int P$ es la suma infinitesimal de la potencia.
- dt es el cambio infinitesimal en el tiempo.

El bioproceso de producción de biomasa microalgal inicia cultivando una cepa de microalga (fig.5) en una caja de Petri para inocular en un tubo de ensayo con medio de cultivo, cada vez que se alcance una concentración celular de diez millones de células por mililitro se desdobla aumentando el volumen, el cultivo es pasado a un matraz, posterior a un garrafón y finalmente al fotobiorreactor para reproducirse bajo las condiciones establecidas hasta el momento de la cosecha microalgal, la cuál es floculada y liofilizada para obtener una biomasa seca (Guevara, 2023; Gárate, 2021).

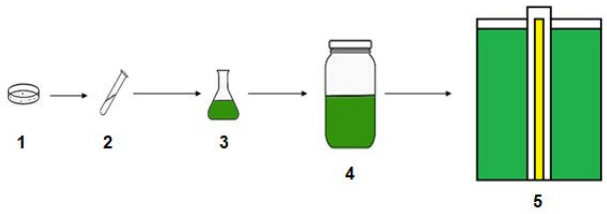


Figura 5.- Proceso de inoculación microalgal.

Un medio de cultivo microalgal es un conjunto de nutrientes, factores de crecimiento (temperatura, iluminación, aireación, pH y salinidad) y otros componentes como el control, el cuidado y el monitoreo constante, que crean las condiciones necesarias para el desarrollo de las microalgas.

ISSN: 2992-8338

Para la formulación del medio de cultivo microalgal en el fotobiorreactor se agregaron los siguientes reactivos, por cada litro de agua de mar (Gárate, 2021):

- 1 ml de hipoclorito de sodio para esterilizar (24 hrs de reposo parcialmente).
- 0.0275 g de tiosulfato de sodio para neutralizar el cloro residual (30 min de reposo parcialmente).
- 1 ml de nitratos.
- 1 ml de fosfatos.
- 1 ml de metales traza.
- 1 ml de vitaminas.

Después del inoculo microalgal y de los experimentos de crecimiento microalgal y consumo eléctrico del fotobiorreactor, se procede a la floculación de las microalgas. El proceso de floculación consiste en añadir al agua o agua residual determinados aditivos químicos con el objetivo de favorecer la sedimentación de materia coloidal no sedimentable o aumentar la rapidez de sedimentación por la formación de flóculos. Para la floculación microalgal es necesario añadir (por goteo hasta alcanzar un pH de 10) a la cosecha del cultivo una mezcla homogénea de los siguientes compuestos (Gárate, 2021):

- 1000 ml de agua destilada.
- 40 g de hidróxido de sodio.

El proceso de liofilización es un método de conservación de algo, en este caso de biomasa microalgal, que consiste en deshidratar la biomasa húmeda sometiéndola a una rápida congelación y eliminando el hielo posteriormente mediante un ligero calentamiento al alto vacío que lo transforma en vapor de agua para obtener una biomasa seca (Guevara, 2023).

Una forma de medir la eficiencia de un fotobiorreactor es relacionando la producción de biomasa con el consumo eléctrico (Schmitz, Pilot scale photobioreactor system for land-based macroalgae cultivation, 2021). La producción de biomasa es directamente proporcional a la eficiencia del fotobiorreactor y el consumo eléctrico es inversamente proporcional a la eficiencia del fotobiorreactor (2).

$$\eta_{FBR} = \frac{\lambda}{E_{FBR}} \quad (2)$$

donde:

- η_{FBR} es la eficiencia del fotobiorreactor.
- λ es la producción de biomasa seca microalgal.
- E_{FBR} es el consumo eléctrico.

3.- EXPERIMENTACIÓN

3.1.- Experimento 1: consumo eléctrico nominal y crecimiento microalgal para la obtención de la eficiencia nominal del fotobiorreactor.

Bioproceso de producción microalgal de *Nannochloropsis Oculata*. El experimento 1 tiene una duración de siete días, del 18/10/2022 siendo el día 1 al 24/10/2022 siendo el día 7, utilizando los parámetros mostrados en la tabla1. El objetivo fue obtener el consumo eléctrico nominal del fotobiorreactor, a partir de los valores nominales de potencia declarados en las hojas de especificaciones de los actuadores y de los tiempos de encendido obtenidos a través de un código en Matlab que analiza la base de datos del sistema de monitoreo del fotobiorreactor. Así como la producción de biomasa para obtener una eficiencia nominal del fotobiorreactor.

Tabla 1.- Parámetros del medio de cultivo de *Nannochloropsis Oculata* 18/10/2022 – 24/10/2022.

Variable	Valor
Temperatura	25 °C
Iluminación	104.5 lm W^{-1}
Aireación	60 L/min
pH	9-11 upH
Salinidad	35 ups

3.2.- Experimento 2: consumo eléctrico real del fotobiorreactor y crecimiento microalgal sin sistema térmico.

Se inició un experimento del consumo eléctrico del fotobiorreactor durante el bioproceso de producción microalgal utilizando parámetros del medio de cultivo (tabla2) similares al experimento 1 y una cepa de *Nannochloropsis Oculata*. El experimento 2 tiene una duración de siete días, del 06/05/2023 al 12/05/2023, tiempo máximo para la cosecha de un lote experimental bajo los parámetros especificados y los 0.08m^3 de volumen del fotobiorreactor. El objetivo de este experimento fue medir el consumo eléctrico del fotobiorreactor (fig.6) a través del sistema de monitoreo de consumo eléctrico implementado (fig.7, fig.8) y comprobar el decaimiento microalgal al no controlar la temperatura del medio de cultivo.

Figura 6.- Cultivo microalgal Nannochloropsis Oculata en fotobiorreactor.

Figura 7.- HER432 implementado.

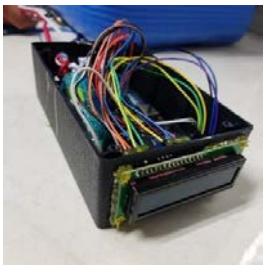


Figura 8.- PZEM004T implementado.

ISSN: 2992-8338

Tabla 2.- Parámetros del medio de cultivo de *Nannochloropsis Oculata* 06/05/2023 – 12/05/2023.

Variable	Valor
Temperatura	Sin control
Iluminación	104.5 lm W^{-1}
Aireación	60 L/min
pH	8.25-8.5 upH
Salinidad	35 ups

3.3.- Experimento 3: consumo eléctrico del fotobiorreactor y crecimiento microalgal con sistema térmico.

Se inició un experimento del consumo eléctrico del fotobiorreactor durante el bioproceso de producción microalgal utilizando parámetros del medio de cultivo (tabla3) iguales al experimento 2 y la misma cepa de *Nannochloropsis Oculata*, con una excepción, utilizar el sistema térmico y controlar la temperatura del medio de cultivo. El experimento tiene una duración de seis días, del 25/05/2023 al 30/05/2023. El objetivo de este experimento es usar el sistema térmico para comprobar el crecimiento microalgal al controlar la temperatura del medio de cultivo y medir el consumo eléctrico del fotobiorreactor (fig.6) a través del sistema de monitoreo de consumo eléctrico implementado (fig.7, fig.8) con el fin de obtener su eficiencia.

Tabla 3.- Parámetros del medio de cultivo de *Nannochloropsis Oculata* 25/05/2023 – 30/05/2023.

Variable	Valor
Temperatura	25 °C
Iluminación	104.5 lm W^{-1}
Aireación	60 L/min
pH	8.25-8.5 upH
Salinidad	35 ups

3.4.- Experimento 4: consumo eléctrico del fotobiorreactor y crecimiento microalgal sin sistema térmico.

Se inició un experimento del consumo eléctrico del sistema térmico (*chiller* y bomba de recirculación) utilizando el sistema de monitoreo de consumo eléctrico (fig.7, fig.8). El objetivo de este experimento es evaluar el consumo eléctrico del sistema térmico al extraer 0.1°C, se realizan cuatro pruebas experimentales en el *chiller* y en la bomba de recirculación para obtener valores promedio de su consumo eléctrico.

4.- RESULTADOS

Los experimentos realizados tienen la finalidad de conocer a detalle el funcionamiento y el comportamiento del consumo eléctrico durante el bioproceso de producción microalgal en fotobiorreactores. El experimento 1 otorga una aproximación sobre la eficiencia nominal del fotobiorreactor (fig.9, tabla4), para este caso tiene una producción de 0.9772 gramos de biomasa microalgal seca por cada kilo Watt hora consumido, lo que representa un costo económico excesivo para fines energéticos, teniendo una referencia al saldo negativo mencionado en la literatura. En comparación, el experimento 2 sobre el consumo eléctrico del fotobiorreactor sin sistema térmico y el experimento 3 sobre el consumo eléctrico del fotobiorreactor con sistema térmico, se puede observar la importancia del control térmico en el bioproceso de producción microalgal, ya que al no controlar la temperatura del medio de cultivo, la concentración celular presenta un decaimiento como se muestra en la fig.10, a diferencia del crecimiento que se muestra en la fig.11, donde sí se controla la temperatura del medio de cultivo, sin embargo, también se observa que al controlar dicho parámetro conlleva a un aumento en el gasto de energía. Utilizar el sistema de control térmico genera un 272% más de consumo eléctrico del fotobiorreactor. En el *experimento 2* se puede observar una eficiencia de 1.45 g kWh^{-1}, así como, los consumos eléctricos totales de cada sistema que conforma al fotobiorreactor, para este caso se tiene que el control de salinidad representa sólo el 0.06% del consumo eléctrico, el control de pH representa el 7.88%, el control de la aireación representa el 14.42%, el control de la iluminación representa el 31.21% mientras que el control temperatura representa el 46.4%, siendo el sistema térmico el que representa mayor gasto energético.

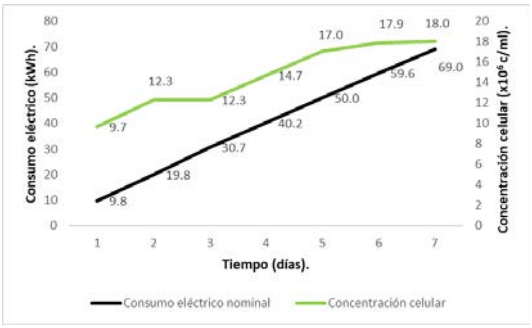


Figura 9.- Consumo eléctrico nominal del fotobiorreactor y crecimiento microalgal *Nannochloropsis Oculata* 18/10/2022 - 24/10/2022.

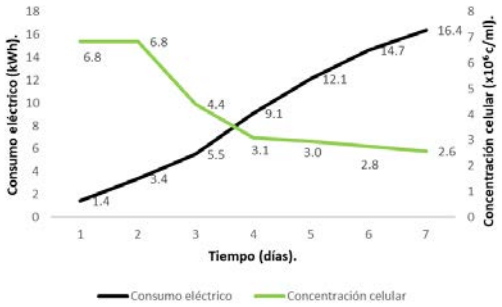


Figura 10.- Consumo eléctrico del fotobiorreactor y crecimiento microalgal sin sistema térmico *Nannochloropsis Oculata* 06/05/2023 - 12/05/2023.

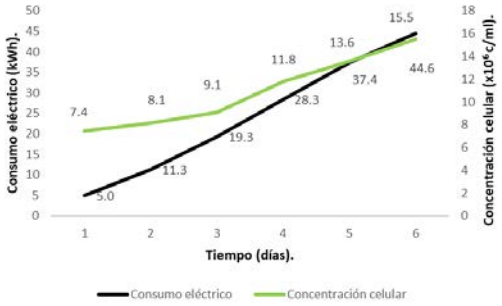


Figura 11.- Consumo eléctrico del fotobiorreactor y crecimiento microalgal con sistema térmico *Nannochloropsis Oculata* 25/05/2023 - 30/05/2023.

ISSN: 2992-8338

Tabla 4.- Consumos eléctricos nominales y eficiencia nominal del fotobiorreactor – *Nannochloropsis Oculata* 18/10/2022 – 24/10/2022.

Sistema	Actuador	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia nominal (kW)	Tiempo de operación (h)	Consumo eléctrico nominal (kWh)
Temperatura	*Chiller*	220	7.27	1.6	20.809	33.2944
	Bomba P.	127	1	0.127	20.809	2.6427
Iluminación	Lámpara LED	12	9.6	0.1152	168	19.3536
	Soplador	6	10	0.060	1.901	0.1140
Aireación	Compresor de aire	12	5	0.060	168	10.08
	Ventilador	115	0.18	0.0207	168	3.4776
pH	Válvula solenoide	120	0.2	0.024	0	0
	Bomba de diafragma	24	6	0.144	0	0
Salinidad	Bomba peristáltica	12	0.4	0.0048	0	0

Consumo eléctrico nominal por sistema (kWh)	Día 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
Temperatura	5.126	5.258	6.089	4.862	5.012	4.922	4.669
Iluminación	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648
Aireación	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368
pH	0	0	0	0	0	0	0
Salinidad	0	0	0	0	0	0	0
Conteo celular ($x10^6$ c/ml)	9.7	12.31	12.30	14.71	17.03	17.91	18

Consumo eléctrico nominal total (kWh)	Biomasa seca (g)	Eficiencia nominal (g kWh^{-1})
68.9622	67.392	0.9772

La biomasa del fotobiorreactor es cosechada para ser floculada, liofilizada y pesada (fig.12), para su relación con la sumatoria del consumo eléctrico real total de los sistemas del fotobiorreactor, obteniendo su eficiencia real (tabla5).

Figura 12.- Cosecha microalgal *Nannochloropsis Oculata*.

Tabla 5.- Consumo eléctrico real y eficiencia real del fotobiorreactor - *Nannochloropsis Oculata* 25/05/2023 – 30/05/2023.

Consumo eléctrico (kWh)	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
Temperatura	2.156	2.317	3.819	4.799	4.309	3.28
Iluminación	1.378	2.492	2.551	2.564	2.483	2.44
Aireación	1.035	1.032	1.116	0.148	1.032	1.067
pH	0.411	0.5	0.501	0.497	1.19	0.414
Salinidad	0.005	0.005	0.004	0.006	0.005	0.006

Consumo eléctrico total (kWh)	Biomasa seca (g)	Eficiencia (g kWh^{-1})
44.562	64.8	1.45

En el experimento 4, como se muestra en la fig.13 y en la fig.14, se hacen pruebas experimentales del consumo eléctrico del sistema térmico conformado por un chiller y una bomba de recirculación en la condición de extraer 0.1°C del medio de cultivo para obtener valores promedio de sus consumos eléctricos (fig.15, fig.16), tardando un tiempo promedio de 65.25 segundos ± 2.61 segundos y un consumo promedio de 29.8 Watt hora ± 1.37 Watt hora por cada 0.1°C extraído.

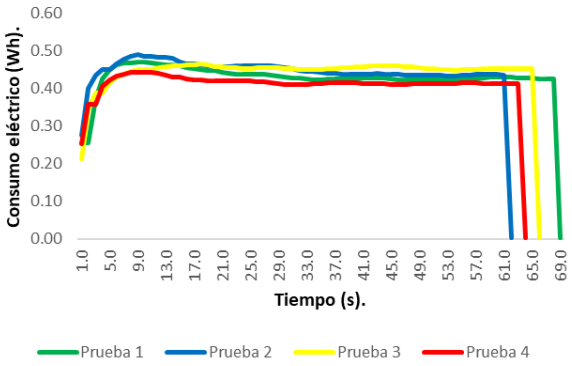


Figura 13.- Pruebas del consumo eléctrico del *chiller*.

ISSN: 2992-8338

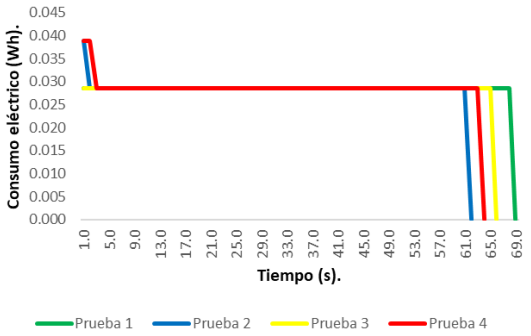


Figura 14.- Pruebas del consumo eléctrico de la bomba de recirculación.

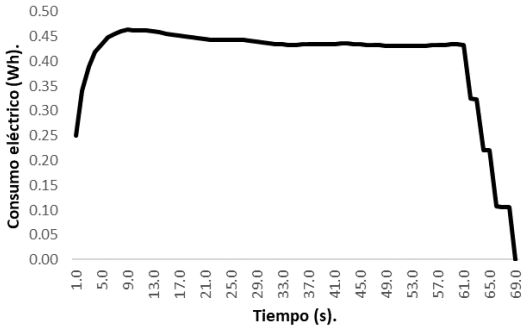


Figura 15.- Consumo eléctrico promedio del *chiller*.

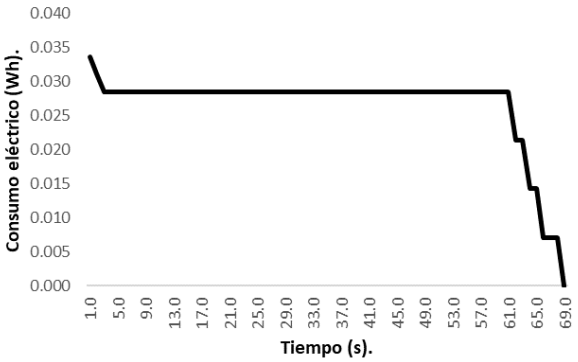


Figura 16.- Consumo eléctrico promedio de la bomba de recirculación.

5.- CONCLUSIÓN.

Los experimentos realizados tienen la finalidad de conocer a detalle el funcionamiento de cada uno de los sistemas que controlan cada una de las variables esenciales del crecimiento microalgal, así como, el comportamiento del consumo eléctrico durante el bioproceso de producción de biomasa en fotobiorreactores.

En conclusión, el sistema térmico en fotobiorreactores es de importancia para el crecimiento microalgal, de lo contrario se presenta un decaimiento del cultivo debido a las altas variaciones de temperatura ambiente que existen en las regiones tropicales del planeta, sin embargo, en el caso de estudio es el sistema que más consume energía eléctrica comparado al resto, por ende, hay un área de oportunidad en aportar a la reducción de consumo eléctrico en sistemas térmicos y contribuir positivamente a la eficiencia de los fotobiorreactores.

Los beneficios de eficientizar los fotobiorreactores se encuentran en darle un mejor aprovechamiento a la energía eléctrica, la reducción del consumo eléctrico es sinónimo de una reducción en el gasto económico de la misma. Además, los fotobiorreactores pueden llegar a tener gran participación en las redes eléctricas nacionales siendo una energía limpia y de recursos biológicos ilimitados.

Actualmente, el sistema térmico de estudio es controlado a través de una estrategia de control de encendido y apagado, lo que genera un gasto excesivo de energía eléctrica cada vez que la temperatura del medio de cultivo supera la temperatura de referencia de la microalga, lo cual deja una brecha para experimentar con nuevas estrategias de control diseñadas para reducir los tiempos de operación de los actuadores y la calidad de operación estos.

6.- BIBLIOGRAFÍA

Bastida, A. A. (2020). *Modelado y control de temperatura de un fotobiorreactor escala piloto con intercambiador de calor.*

Gárate, A. (2021). *Análisis del potencial de la microalga Dunaliella tertiolecta para producción de biodiesel.*

Guevara, O. (2023). *Composición lipídica y producción de acidos grasos de Nannochloropsis sp bajo estrés térmico y deficit de nitrogeno en un fotobiorreactor piloto y su potencial para la producción de biodiesel.*

Huang, Q. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*.

Jiménez, A. (2017). *Diseño, modelado y control de un fotobiorreactor.*

Salguero, Y. (2020). Static mixer proposal for tubular photobioreactors to reduce mixing energy consuptiom and enhance light dark cycles. *Grupo de automática GAUNAL*.

Schmitz, T. (2021). Pilot scale photobioreactor system for land-based macroalgae cultivation. *Journal of Applied Phycology*.

Schmitz, T. (2022). Pilot scale photobioreactor system for land based macroalgae cultivation. *Journal of Applied Phycology*.

Sukacova, K. (2021). Perspective design of algae photobioreactor for greenhouses a comparative study. *MDPI energies*.

Torzillo, G. (s.f.). Temperature as an important factor affecting productivity and night biomass loss in Spirulina platensis grown outdoors in tubular photobioreactors. *Bioresource Technology*.

ISSN: 2992-8338

Consensus based formation control under battery degradation for multiagent systems

Isay O. Huicochea Rios * **Jesus A. Vazquez Trejo** *
Manuel Adam Medina** **Carlos D. García Beltrán** ***

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. (e-mail: m21ce081@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: In this article, a leader-following formation control based on an observer for multiagent systems under battery malfunction is presented. The conditions for the controller are expressed by a set of linear matrix inequalities (LMIs). To assess the effectiveness of the control, a simulation scenario was proposed, which consists of a fleet of unmanned aerial vehicles (UAVs) tracking a trajectory while one agent experiences a sudden voltage drop in its battery.

Keywords: Multiagent, UAV, Leader-Following, Battery, Formation Control.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de los sistemas multiagente ha aumentado a lo largo de los años en distintas áreas, desde la industria de manufactura e ingeniería eléctrica hasta el campo militar y la medicina moderna (Bao et al. (2022)). Las misiones de búsqueda de objetivos (Hu et al. (2012)), reconocimiento (Farah et al. (2008)) y mapeo de áreas (Albani et al. (2017)) son algunas de las aplicaciones de mediana y gran escala de los sistemas multiagente, siendo la batería un componente primordial para realizar estas aplicaciones. Sin embargo, los trabajos relacionados con la batería y su comportamiento fallado o defectuoso se limitan a optimizaciones (Schacht-Rodríguez et al. (2018)), estimación (Kim et al. (2021)) y diagnóstico de fallas (Xiong et al. (2019)). Las estrategias de control de formación son líder seguidor, *behavior-based*, estructura virtual, evasión de obstáculos y métodos basados en grafos algebraicos (Ziquan et al. (2022)), las cuales han sido ampliamente utilizadas.

Al realizar tareas de mediana y gran escala, es posible que un UAV de una flota presente fallas en algún componente. En Liu et al. (2017) se presentó un control tolerante a fallas activo, basado en técnicas de parámetros lineales variantes (LPV), donde se e comparan dos controles: uno nominal y el control propuesto, el cual es una retroalimentación de estados robusta. Ambos fueron simulados con diferentes porcentajes de efectividad en la batería, y dicho control se aplicó al modelo LPV de un UAV. Las actividades realizadas por UAVs son afectadas en mayor medida que los vehículos convencionales. La densidad del aire (Shahmoradi et al. (2022)), las corrientes de aire (Chodnicki et al. (2022)), y las bajas temperaturas (Zhang et al. (2019)) son condiciones que afectan directamente a la capacidad de la batería y su desempeño (Beigi et al. (2022)). Los efectos del desgaste de las baterías se presentan usualmente como cambios en la capacidad y potencia de estas.

La contribución de este trabajo es el diseño de un control de formación líder seguidor basado en observador para sistemas multiagente aplicado a una flota de UAVs bajo la degradación de su batería, cuya causa no se establece previamente. El control diseñado alcanza el consenso mediante el análisis de la estabilidad en el enfoque de Lyapunov, los motores de cada agente son representados por un modelo electromecánico y la batería es representada por el modelo de conteo de amperes.

2. PRELIMINARES

Sea $\mathcal{Z}$ una matriz y $\mathcal{Z}^T$ la transpuesta de la matriz, $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}^T > 0$ denota una matriz simétrica definida positiva, $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}^T < 0$ denota una matriz simétrica definida negativa. El conjunto de números reales se representa por $\mathbb{R}$. La norma Euclidiana se representa por $\|\cdot\|$. Los términos simétricos de una matriz simétrica se representan por $*$. $He\{\mathcal{Z}\} := \mathcal{Z} + \mathcal{Z}^T$ denota la parte hermitiana de una matriz cuadrada $\mathcal{Z}$. El producto Kronecker se representa por $\otimes$.

Lema 1 *(Vazquez Trejo et al. (2021)): Para matrices reales $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$, y $\bar{D}$ con dimensiones apropiadas, el producto Kronecker $\otimes$ cuenta con las siguientes propiedades:*

(1) $(\bar{A}+\bar{B})\otimes\bar{C} = \bar{A}\otimes\bar{C} + \bar{B}\otimes\bar{C}$,
(2) $(\bar{A}\otimes\bar{B})^T = \bar{A}^T\otimes\bar{B}^T$,
(3) $(\bar{A}\otimes\bar{B})(\bar{C}\otimes\bar{D}) = (\bar{A}\bar{C})\otimes(\bar{B}\bar{D})$.

Lema 2 *(Relación de Young Kheloufi et al. (2013)): Dadas las matrices $\mathcal{X}$ y $\mathcal{Y}$ de dimensiones apropiadas, para cualquier matriz invertible $\mathcal{S}$ y cualquier escalar $\mu > 0$ se tiene lo siguiente:*

$$\mathcal{X}^T\mathcal{Y} + \mathcal{Y}^T\mathcal{X} \leq \mu\mathcal{X}^T\mathcal{S}\mathcal{X} + \mu^{-1}\mathcal{Y}^T\mathcal{S}^{-1}\mathcal{Y}.$$

⋆ Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

ISSN: 2992-8338

Lema 3 *(Complemento de Schur Chen et al. (2016)): Dada la matriz simétrica* $\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{B}^T & \bar{C} \end{bmatrix} < 0$, *los siguientes planteamientos son equivalentes:*

(1) $\bar{A} < 0$, $\bar{C} - \bar{B}^T \bar{A}^{-1} \bar{B} < 0$,
(2) $\bar{C} < 0$, $\bar{A} - \bar{B}^T \bar{C}^{-1} \bar{B} < 0$.

En Vazquez Trejo et al. (2021) un grafo directo $\mathcal{G}$ es un par $(\mathcal{V}, \mathcal{E})$, donde $\mathcal{V} = \{\mathbb{V}_1, \mathbb{V}_2, \ldots, \mathbb{V}_\mathcal{N}\}$ es un conjunto finito no vacío de nodos (agentes) y $\mathcal{E} = \{(i,j) : i,j \in \mathcal{V}\} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ es un conjunto de enlaces. $\mathcal{N}$ es el número total de agentes. Los agentes vecinos del agente i son denotados como $j \in \mathcal{N}_i$. La matriz de adyacencias $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{\mathcal{N}\times\mathcal{N}}$ asociada con el grafo $\mathcal{G}$ se define como: $a_{ii} = 0$, $a_{ij} > 0$ si y solo si $(i,j) \in \mathcal{E}$ y de lo contrario $a_{ij} = 0$. La matriz de adyacencias de un grafo bidireccional se define como $a_{ij} = a_{ji}$, $\forall i \neq j$ y $\mathcal{A} = \mathcal{A}^T$. La matriz Laplaciana $\mathcal{L} \in \mathbb{R}^{\mathcal{N}\times\mathcal{N}}$ se define como $\mathcal{L}_{ii} = \Sigma_{j\neq i} a_{ij}$ y $\mathcal{L}_{ij} = -a_{ij}$. Sea $\alpha_i > 0$ sí existe un enlace directo del agente líder al agente i, de lo contrario $\alpha_i = 0$, y $\Lambda = diag(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_\mathcal{N})$, por lo tanto $\bar{\mathcal{L}} = \mathcal{L} + \Lambda$.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Considere un sistema multiagentes donde cada agente es representado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t), \\ y_i(t) &= Cx_i(t), \end{aligned} \tag{1}$$

donde $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, i representa el número de agentes $\mathcal{N}$ en el sistema, $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entradas, $y_i(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salidas, con matrices $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times m}$ y $C \in \mathbb{R}^{p\times n}$.

Este trabajo tiene como objetivo diseñar un control de formación líder seguidor para el sistema multiagente en (1) tal que todos los agentes converjan a las posiciones predefinidas y siguiendo al líder, además, consigan el objetivo incluyendo las dinámicas del sistema de la batería y de los motores. Por lo tanto, el modelo dinámico del líder se describe de la forma:

$$\dot{x}_l(t) = Ax_l(t) + Bu_l(t), \tag{2}$$

donde $x_l(t) \in \mathbb{R}^n$ es un vector de estados, $u_l(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entradas y l representa al agente líder. Definiendo $\delta_i(t) = x_i(t) - x_l(t)$, como un error de sincronización, la dinámica del error de sincronización entre cada agente y el líder es:

$$\dot{\delta}_i(t) = A\delta_i(t) + B(u_i(t) - u_l(t)). \tag{3}$$

Se dice que el seguimiento del líder es alcanzado si se satisface:

$$\lim_{t\to\infty} \|x_i(t) - x_l(t)\| = 0, \ \forall i = 1, 2, \ldots, \mathcal{N}. \tag{4}$$

Para alcanzar el seguimiento del líder se propone la siguiente ley de control líder seguidor basada en observador (Vazquez Trejo et al. (2021)):

$$\begin{aligned} u_i(t) =& K\sum_{j=1}^{\mathcal{N}} a_{ij}(\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t)) \\ &+ K\alpha_i(\hat{x}_i(t) - x_l(t)) + u_l(t) \end{aligned} \tag{5}$$

donde $K \in \mathbb{R}^{m\times n}$ es la ganancia del controlador, $\alpha_i \geq 0$ es una constante positiva, $\hat{x}_i(t)$ es el vector de estados estimados del agente i, y $\hat{x}_j(t)$ es el vector de estados estimados del agente j. El vector de estados estimados está dado por el siguiente observador Luenberger:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) &= A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + Le_i(t), \\ \hat{y}(t)_i &= C\hat{x}_i(t), \\ e_i(t) &= y_i(t) - \hat{y}_i(t), \end{aligned} \tag{6}$$

donde $L \in \mathbb{R}^{n\times m}$ es la ganancia del observador, $\hat{y} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de salidas estimadas y $e \in \mathbb{R}^n$ es el vector de errores de estimación. La dinámica del error de estimación está dada por:

$$\dot{e}_i(t) = A - LCe_i(t) \tag{7}$$

Dado el sistema multiagente (1), el objetivo de este artículo es calcular las ganancias K y L, las cuales se encuentran en las ecuaciones (5) y (6).

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR BASADO EN OBSERVADOR LÍDER-SEGUIDOR

A continuación se presenta el análisis de estabilidad utilizando el enfoque de Lyapunov para el diseño de un control de formación líder seguidor basado en observador. Suficientes condiciones son presentadas para garantizar el consenso líder seguidor para el sistema multiagente (1).

La dinámica del error de sincronización (3) y de estimación (7) pueden ser expresadas usando el producto Kronecker como:

$$\dot{e}(t) = (I_\mathcal{N} \otimes (A - LC))e(t), \tag{8}$$

$$\dot{\delta}(t) = (I_\mathcal{N} \otimes A + \bar{\mathcal{L}} \otimes BK)\delta(t) - (\bar{\mathcal{L}} \otimes BK)e(t), \tag{9}$$

donde $e(t) = [e_1(t), e_2(t), \ldots, e_\mathcal{N}(t)]^T$ es el vector de errores de estimación, $\delta(t) = [\delta_1(t), \delta_2(t), \ldots, \delta_\mathcal{N}(t)]^T$ es el vector de errores de sincronización, $\bar{\mathcal{L}} = \mathcal{L} + \Lambda$ es la suma de la matriz Laplaciana $\mathcal{L}$ y la matriz que representa el intercambio de información entre el líder y los seguidores $\Lambda = diag(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_\mathcal{N})$ y $I_\mathcal{N}$ es una matriz identidad de dimensión $\mathcal{N}$. Las ecuaciones (8) y (9) nos permiten definir el siguiente sistema en lazo cerrado:

$$\dot{\xi} = \tilde{A}\xi \tag{10}$$

donde: $\tilde{A} = \begin{bmatrix} I_\mathcal{N} \otimes A + \bar{\mathcal{L}} \otimes BK & -\bar{\mathcal{L}} \otimes BK \\ 0 & I_\mathcal{N} \otimes (A - LC) \end{bmatrix}$ y

$\xi = \begin{bmatrix} \delta \\ e \end{bmatrix}$.

4.1 Análisis de estabilidad del control

El análisis de estabilidad del sistema en lazo cerrado (10) se presenta en este apartado. Se propone la siguiente función cuadrática como candidata de Lyapunov:

$$V(\xi) = \xi^T \begin{bmatrix} I_\mathcal{N} \otimes P_1 & 0 \\ 0 & I_\mathcal{N} \otimes P_2 \end{bmatrix} \xi > 0, \tag{11}$$

donde $P_1 \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $P_1 = {P_1}^T > 0$ y $P_2 \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $P_2 = {P_2}^T > 0$. La derivada de (11) a lo largo de las trayectorias de (10) está dada por:

$$\dot{V}(\xi) = 2\xi^T \begin{bmatrix} I_\mathcal{N} \otimes P_1 & 0 \\ 0 & I_\mathcal{N} \otimes P_2 \end{bmatrix} \dot{\xi} > 0. \tag{12}$$

Sustituyendo el sistema en lazo cerrado (10) en la derivada de la función candidata (12), se obtiene que la derivada de la función candidata es la siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\xi) =& 2\delta^T(I_\mathcal{N} \otimes P_1A + \bar{\mathcal{L}} \otimes P_1BK)\delta \\ &- 2\delta^T(\bar{\mathcal{L}} \otimes P_1BK)e \\ &+ 2e^T(I_\mathcal{N} \otimes P_2(A - LC))e < 0 \end{aligned} \tag{13}$$

ISSN: 2992-8338

Se define una descomposición espectral de la matriz $\bar{\mathcal{L}}$, tal que $\bar{\mathcal{L}} = TJT^{-1}$, donde $T \in \mathbb{R}^{\mathcal{N}\times\mathcal{N}}$ es una matriz invertible y es una matriz diagonal $J = diag(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{\mathcal{N}}) \in \mathbb{R}^{\mathcal{N}\times\mathcal{N}}$ donde λ_j son los eigenvalores de $\bar{\mathcal{L}}$. Definiendo los cambios de coordenadas $\varphi = (T^{-1} \otimes I_{\mathcal{N}})\delta$ y $\phi = (T^{-1} \otimes I_{\mathcal{N}})e$ la ecuación (13) se reescribe como:

$$\begin{aligned}\dot{V}(\xi) = \sum_{j=1}^{\mathcal{N}} \big[&{\varphi_j}^T He\{P_1A + \lambda_j P_1 BK\}\varphi_j \\ &- 2{\varphi_j}^T \lambda_j P_1 BK\phi_j \\ &+ {\phi_j}^T He\{P_2A - P_2LC\}\phi_j\big] < 0,\end{aligned} \tag{14}$$

considerando el vector $\begin{bmatrix}{\varphi_j}^T & {\phi_j}^T\end{bmatrix}^T$, la ecuación (14) es reescrita como:

$$\dot{V}(\xi) = \sum_{j=1}^{\mathcal{N}} \begin{bmatrix}{\varphi_j}^T & {\phi_j}^T\end{bmatrix} \vartheta \begin{bmatrix}\varphi_j \\ \phi_j\end{bmatrix} < 0, \tag{15}$$

donde

$$\vartheta = \begin{bmatrix} He\{P_1A + \lambda_j P_1 BK\} & -\lambda_j P_1 BK \\ * & He\{P_2A - P_2LC\}\end{bmatrix} < 0; \tag{16}$$

pre-multiplicando y post-multiplicando ϑ de la siguiente manera se obtiene Θ:

$$\begin{aligned}\Theta &= \begin{bmatrix}{P_1}^{-1} & 0 \\ 0 & I_{\mathcal{N}}\end{bmatrix} \vartheta \begin{bmatrix}{P_1}^{-1} & 0 \\ 0 & I_{\mathcal{N}}\end{bmatrix} < 0 \\ &= \begin{bmatrix} He\{A{P_1}^{-1} + \lambda_j BK{P_1}^{-1}\} & -\lambda_j BK{P_1}^{-1} \\ * & He\{P_2A - P_2LC\}\end{bmatrix} < 0,\end{aligned} \tag{17}$$

la matriz Θ se puede ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix}\Theta_{11} & 0 \\ * & \Theta_{22}\end{bmatrix} + He\left\{\begin{bmatrix}\Theta_{12} \\ 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0 & I_{\mathcal{N}}\end{bmatrix}\right\} < 0. \tag{18}$$

Aplicando el ***Lema 2***, se obtiene la siguiente desigualdad:

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}\Theta_{11} & 0 \\ * & \Theta_{22}\end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix}\Theta_{12} \\ 0\end{bmatrix} P_1 \begin{bmatrix}{\Theta_{22}}^T & 0\end{bmatrix} \\ &\qquad + \mu^{-1}\begin{bmatrix}0 \\ I_{\mathcal{N}}\end{bmatrix} {P_1}^{-1}\begin{bmatrix}0 & I_{\mathcal{N}}\end{bmatrix} < 0,\end{aligned} \tag{19}$$

después, aplicando el ***Lema 3***, la desigualdad (19) se reescribe como:

$$\sum_{j=1}^{\mathcal{N}} \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & Q_3 & 0 \\ * & Q_2 & 0 & I_{\mathcal{N}} \\ * & * & -\mu^{-1}\mathcal{P}_1 & 0 \\ * & * & * & -\mu\mathcal{P}_1\end{bmatrix} < 0, \tag{20}$$

donde $Q_1 = He\{\mathcal{P}_1A + \lambda_j B\bar{N}\}$, $Q_2 = He\{P_2A - \bar{M}C\}$, $Q_3 = -\lambda_j B\bar{N}$, $\mathcal{P}_1 = {P_1}^{-1}$, $\bar{N} = K\mathcal{P}_1$, $\bar{M} = P_2L$ y $*$ denota los elementos simétricos de la matriz (20).

Teorema 1 (Vazquez Trejo et al. (2023)): Considere el sistema en lazo cerrado en (10), dados los eigenvalores $\lambda_j(\bar{\mathcal{L}})$, $j = 1, 2, \ldots, \mathcal{N}$; si existen matrices $\mathcal{P}_1 = {\mathcal{P}_1}^T > 0$, $P_2 = {P_2}^T > 0$, $\bar{N}$, $\bar{M}$, y el escalar $\mu > 0$ fijo tal que la desigualdad matricial (20) se cumpla, entonces la ganancia del observador se calcula como $L = {P_2}^{-1}\bar{M}$ y la ganancia del control como $K = \bar{N}{\mathcal{P}_1}^{-1}$; resolviendo así, el problema líder seguidor basado en observador para el sistema multiagente (1) por medio del controlador (5).

5. EJEMPLO NUMÉRICO

En la sección actual se presenta un ejemplo numérico, el cual consiste de un sistema multiagente compuesto por UAVs, los cuales son representados por el modelo Newton-Euler (Fernando et al. (2013)) a continuación:

$$\begin{aligned}\ddot{X}_i &= (cos\phi_i sen\theta_i cos\psi_i + sen\phi_i sen\psi_i)\frac{u_{zi}}{m}, \\ \ddot{Y}_i &= (cos\phi_i sen\theta_i sen\psi_i - sen\phi_i cos\psi_i)\frac{u_{zi}}{m}, \\ \ddot{Z}_i &= -g + (cos\phi_i cos\theta_i)\frac{u_{zi}}{m}, \\ \ddot{\phi}_i &= \frac{J_Y - J_Z}{J_X}\dot{\theta}_i\dot{\psi}_i + \frac{u_{\phi i}}{J_X}, \\ \ddot{\theta}_i &= \frac{J_Z - J_X}{J_Y}\dot{\phi}_i\dot{\psi}_i + \frac{u_{\theta i}}{J_Y}, \\ \ddot{\psi}_i &= \frac{J_X - J_Y}{J_Z}\dot{\theta}_i\dot{\phi}_i + \frac{u_{\psi i}}{J_Z}.\end{aligned} \tag{21}$$

Donde X, Y y Z son las posiciones traslacionales del i-ésimo agente, ϕ, θ y ψ son los ángulos de Euler *roll*, *pitch* y *yaw*, u_z es la fuerza de empuje en el eje z o *thrust*, u_ϕ, u_θ y u_ψ son los pares rotacionales sobre los ángulos de Euler, m es la masa de los drones del sistema, g es la aceleración de la gravedad y J_X, J_Y y J_Z son los momentos de inercia con respecto a los 3 ejes.

El sistema multiagente está compuesto por 3 agentes homogéneos, es decir, de parámetros idénticos, la comunicacion del sistema está dada por el grafo de comunicación en la figura 1.

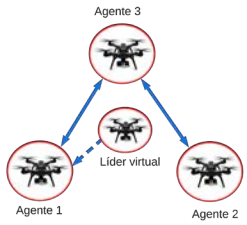


Fig. 1. Topología de comunicación.

Las matrices Laplaciana ($\mathcal{L}$), de adyacencias ($\mathcal{A}$) y de comunicación con el líder (Λ) de la topología en la figura 1 son:

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix}2 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix}, \tag{22}$$

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix}, \tag{23}$$

$$\Lambda = diag(1, 0, 0), \tag{24}$$

así como la matriz de distancias relativas H se define como:

$$H = \begin{bmatrix}-1.5 & 1.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1.5 & -1.5 & 1.5\end{bmatrix}, \tag{25}$$

donde $H = [h_1, h_2, \ldots, h_{\mathcal{N}}]$. Para alcanzar una formación predefinida, el consenso (5) se modifica, obteniendo así la siguiente expresión (Vazquez Trejo et al. (2023)):

$$\bar{u}_i = K\sum_{j=1}^{\mathcal{N}} a_{ij}(\mathcal{S}_i - \mathcal{S}_j) + K\alpha_i(\mathcal{S}_i - x_l) + u_l, \tag{26}$$

donde $\mathcal{S}_i = x_i - h_i$, el vector de estados es $x_i = [X_i, \dot{X}_i, Y_i, \dot{Y}_i, Z_i, \dot{Z}_i, \phi_i, \dot{\phi}_i, \theta_i, \dot{\theta}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i]^T$, h_i es el vector de posiciones predefinidas del agente i (25), el vector de entradas de control de los agentes es $\bar{u}_i = [\bar{u}_{zi}, \bar{u}_{\phi i}, \bar{u}_{\theta i}, \bar{u}_{\psi i}]^T$, x_l es el vector de estados del líder, u_l es el vector de

ISSN: 2992-8338

entradas de control del agente líder, K es la matriz de ganancias, a_{ij} es el enlace de comunicación entre el i-ésimo y j-ésimo agente (23), $\mathcal{N}$ es el número de agentes y α_i es el enlace de comunicación entre el líder y el agente i (24).

La ganancia del protocolo de consenso modificado (26) se calcula resolviendo la desigualdad matricial lineal (LMI) propuesta (20) utilizando el *toolbox* Yalmip de Matlab. Tomando ciertas consideraciones, el modelo Newton-Euler (21) se simplifica, y esta dado por:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= g\theta, & \ddot{\phi} &= \frac{u_\phi}{J_x}, \\ \ddot{y} &= -g\phi, & \ddot{\theta} &= \frac{u_\theta}{J_y}, \\ \ddot{z} &= -g + \frac{u_z}{m}, & \ddot{\psi} &= \frac{u_\psi}{J_z}. \end{aligned} \tag{27}$$

Las matrices A, B y C obtenidas del modelo (27) son las sustituidas en la LMI (20) para obtener la ganancia K del protocolo de consenso (26).

Con la finalidad de incluir la dinámica de la batería y de los motores de los agentes, se definen las entradas de control del UAV en función de las velocidades angulares de los agentes (Jun et al. (2018)):

$$u = \Gamma\Omega^2. \tag{28}$$

Manipulando (28) es posible obtener las velocidades angulares de cada motor por medio de la siguiente expresión:

$$\bar{\Omega} = \sqrt{\Gamma^{-1}\bar{u}}, \tag{29}$$

donde u es el vector de entradas calculadas por el protocolo de consenso, $\Omega = [\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4]^T$ es el vector de velocidades angulares, $\bar{\Omega} = [\bar{\Omega}_1, \bar{\Omega}_2, \bar{\Omega}_3, \bar{\Omega}_4]^T$ es el vector de velocidades angulares obtenidas a partir del protocolo de consenso y la matriz Γ está definida como:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -bl & 0 & bl & 0 \\ 0 & -bl & 0 & bl \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix}. \tag{30}$$

Los parámetros b, d y l son la constante de empuje, la consta de de arrastre y la distancia de cada motor al centro de masa del UAV respectivamente.

Las velocidades angulares de los motores se obtienen por medio de las siguientes ecuaciones (Poovizhi et al. (2017), Lee et al. (2019)):

$$\begin{aligned} \dot{\Omega} &= \left[(V_{batt} Dc - K_E \Omega) \frac{K_E}{R} - d\Omega^2 - D_f \Omega - T_f \right] \frac{1}{J_E}, \\ I_{batt} &= \sum_{\mathcal{M}=1}^{N_\mathcal{M}} (V_{batt} \cdot Dc_\mathcal{M} - K_E \cdot \Omega_\mathcal{M}) \frac{Dc_\mathcal{M}}{R}. \end{aligned} \tag{31}$$

El ciclo de trabajo Dc es calculado por:

$$Dc = \gamma_1 \bar{\Omega}^2 + \gamma_2 \bar{\Omega} + \gamma_3, \tag{32}$$

donde γ_1, γ_2 y γ_3 son los coeficientes de la función polinómica, $N_\mathcal{M}$ es el número de motores, $\mathcal{M}$ representa cada motor, I_{batt} es la corriente total consumida por los motores V_{batt} es el voltaje de la batería. Además, los parámetros K_E, J_E, D_f, d y T_f son la fuerza contra electromotriz, el momento inercial de los BLMs, el coeficiente de amortiguamiento viscoso, la constante de arrastre y el par causado por la fricción respectivamente.

El modelo de la batería de polímero de litio de los UAVs del sistema se expresa como (Schacht-Rodriguez et al. (2017)):

$$\begin{aligned} \dot{V}_{SoC} &= -\frac{1}{3600 C_T} I_{batt}, \\ \dot{V}_d &= -\frac{1}{R_d C_d} V_d + \frac{1}{C_d} I_{batt}, \\ V_{OCV}(V_{SoC}) &= \sum_{\tilde{i}=0}^{\tilde{n}-1} \tilde{\lambda}_{\tilde{i}} {V_{SoC}}^{\tilde{i}} + \tilde{\lambda}_{\tilde{n}} \ln(V_{SoC}) V_{SoC}, \\ V_{batt} &= V_{OCV}(V_{SoC}) - V_d - R_{int} I_{batt}, \end{aligned} \tag{33}$$

donde V_{SoC} es el SoC, C_T es la capacidad total de la batería, $V_{OCV}(V_{SoC})$ es el voltaje de circuito abierto, I_{batt} es la corriente total consumida, R_{int} es la resistencia interna de la batería, R_d y C_d es la resistencia y capacitancia de la batería, V_d es la respuesta transitoria de la batería, V_{batt} es el voltaje de la batería, $\tilde{n}$ es el orden de la función polinómica y $\tilde{\lambda}_{\tilde{i}}$ son los coeficientes del polinomio.

El objetivo del sistema es realizar una formación predefinida mientras se sigue al agente líder cuando el agente 1 (A_1) tiene una caída de voltaje de 5 volts en su batería los 10 segundos de la simulación (ver figura 3), la trayectoria de referencia del agente líder se observa en la figura 2.

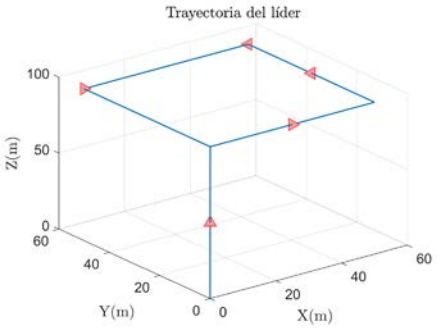


Fig. 2. Trayectoria de referencia del líder seguidor.

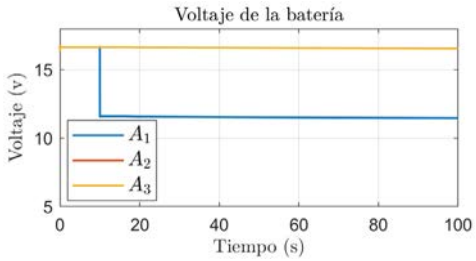


Fig. 3. Voltaje de las baterías de los agentes del sistema.

A pesar del decrecimiento acelerado del SoC de la batería del agente uno (ver figura 4), se puede observar en la figura 5 que el sistema multiagente es capaz de seguir al líder.

ISSN: 2992-8338

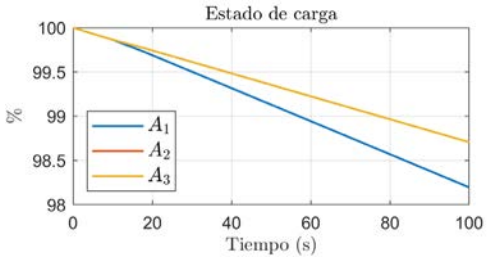


Fig. 4. SoC de los agentes del sistema.

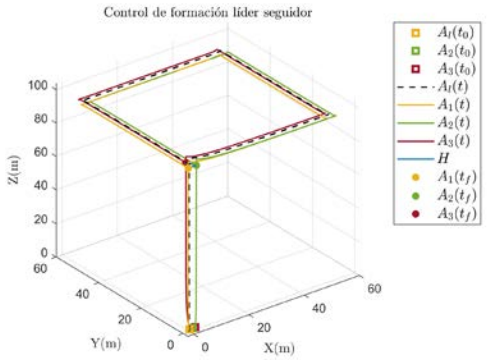


Fig. 5. Trayectoria realizada por el sistema multiagente.

En la figura 6 se observa que la ley de control calculada eleva su valor; de esta manera, la fuerza de empuje u_{z1} suministrada al agente cuya batería sufre una caída de voltaje alcanza el mismo valor que las fuerzas de empuje suministradas a los agentes sin un funcionamiento defectuoso.

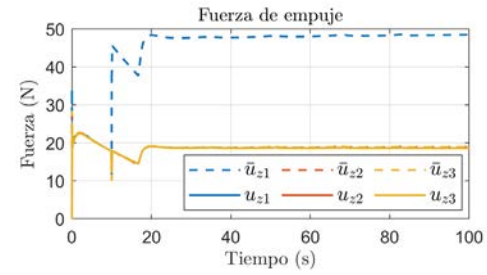


Fig. 6. Fuerza de empuje en el eje z de los agentes del sistema.

El error de sincronización está definido por $\delta_i = \|x_i - x_l\| - \|h_i\|$. En la figura 7 se observa el comportamiento de δ_i a lo largo del tiempo. Los agentes del sistema siguen la trayectoria del líder alcanzando su posición predefinida cuando $\delta_1 = 0$.

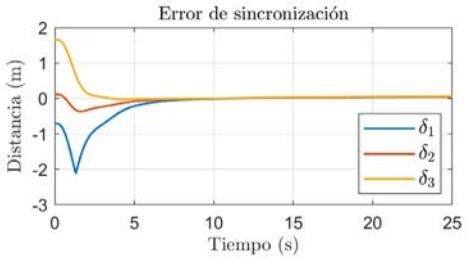


Fig. 7. Error de sincronización del sistema multiagente.

El error de formación se define como $d_{ij} = \|(p_i - p_j) - (h_i - h_j)\|$, donde $p_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$. En la figura 8 se observa el comportamiento de d_{ij} a lo largo del tiempo. Los agentes del sistema alcanzan la formación predefinida cuando $d_{ij} = 0$.

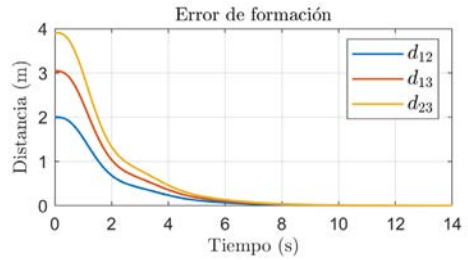


Fig. 8. Error de formación del sistema multiagente.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó un control líder seguidor basado en consenso para sistemas multiagente, cuyo líder cuenta con una dinámica no lineal; además, se añadieron los motores y la batería de cada UAV del sistema con la finalidad de analizar el comportamiento de la batería en particular. Los resultados de simulación muestran que la flota de UAVs fue capaz de seguir las trayectorias del líder virtual y mantener la formación predefinida a pesar de tener una caída notable en el voltaje de la batería de uno de los UAVs del sistema. Es interesante proponer como trabajo futuro la estimación de los parámetros de los motores de un UAV, así como la obtención experimental de estos.

REFERENCIAS

Albani, D., Nardi, D., and Trianni, V. (2017). Field coverage and weed mapping by uav swarms. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 4319–4325. Ieee.

Bao, G., Ma, L., and Yi, X. (2022). Recent advances on cooperative control of heterogeneous multi-agent systems subject to constraints: A survey. *Systems Science & Control Engineering*, 10(1), 539–551.

Beigi, P., Rajabi, M.S., and Aghakhani, S. (2022). An overview of drone energy consumption factors and models. *Handbook of Smart Energy Systems*, 1–20.

Chen, J., Zhang, W., Cao, Y.Y., Cai, Y., and Yao, L. (2016). Observer-based consensus control against actuator faults for linear parameter-varying multi-agent

ISSN: 2992-8338

systems. *2016 American Control Conference (ACC)*, 2832–2839.

Chodnicki, M., Siemiatkowska, B., Stecz, W., and Stepien, S. (2022). Energy efficient uav flight control method in an environment with obstacles and gusts of wind. *Energies*, 15(10). doi:10.3390/en15103730. URL `https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3730`.

Farah, I.R., Boulila, W., Ettabaa, K.S., and Ahmed, M.B. (2008). Multiapproach system based on fusion of multispectral images for land-cover classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(12), 4153–4161.

Fernando, H., De Silva, A., De Zoysa, M., Dilshan, K., and Munasinghe, S. (2013). Modelling, simulation and implementation of a quadrotor uav. In *2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems*, 207–212. IEEE.

Hu, J., Xie, L., Lum, K.Y., and Xu, J. (2012). Multiagent information fusion and cooperative control in target search. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(4), 1223–1235.

Jun, W., Xiong-Dong, Y., and Yu-Yang, T. (2018). Fault-tolerant control design of quadrotor uav based on cpso. In *2018 IEEE 4th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, 279–283. doi:10.1109/CCSSE.2018.8724803.

Kheloufi, H., Zemouche, A., Bedouhene, F., and Boutayeb, M. (2013). On lmi conditions to design observer-based controllers for linear systems with parameter uncertainties. *Automatica*, 49, 3700–3704.

Kim, W., Lee, P.Y., Kim, J., and Kim, K.S. (2021). A robust state of charge estimation approach based on nonlinear battery cell model for lithium-ion batteries in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(6), 5638–5647. doi:10.1109/TVT.2021.3079934.

Lee, U.H., C.-W., P., and J., R.E. (2019). Empirical characterization of a high-performance exterior-rotor type brushless dc motor and drive. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 8018–8025. doi:10.1109/IROS40897.2019.8967626.

Liu, Z., Yuan, C., and Zhang, Y. (2017). Active fault-tolerant control of unmanned quadrotor helicopter using linear parameter varying technique. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 88, 415–436.

Poovizhi, M., Kumaran, M.S., Ragul, P., Priyadarshini, L.I., and Logambal, R. (2017). Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor(bldc) drives by using matlab-simulink. In *2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, 178–183. doi:10.1109/ICPEDC.2017.8081083.

Schacht-Rodriguez, R., Ortiz-Torres, G., García-Beltrán, C., Astorga-Zaragoza, C., Ponsart, J., and Theilliol, D. (2017). Soc estimation using an extended kalman filter for uav applications. In *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 179–187. doi:10.1109/ICUAS.2017.7991381.

Schacht-Rodríguez, R., Ponsart, J., García-Beltrán, C.D., Astorga-Zaragoza, C., Theilliol, D., and Zhang, Y. (2018). Path planning generation algorithm for a class of uav multirotor based on state of health of lithium polymer battery. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 91, 115–131. doi:https://doi.org/10.1007/s10846-018-0870-0.

Shahmoradi, J., Roghanchi, P., and Hassanalian, M. (2022). Design, analysis and prototyping of a spherical drone for underground mines. *International Journal of Theoretical and Applied Multiscale Mechanics*, 4(1), 58–82.

Vazquez Trejo, J.A., Ponsart, J.C., Adam-Medina, M., Valencia-Palomo, G., and Theilliol, D. (2023). Distributed observer-based leader-following consensus control for lpv multi-agent systems: Application to multiple vtol-uavs formation control. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1316–1323. doi:10.1109/ICUAS57906.2023.10156012.

Vazquez Trejo, J.A., Adam Medina, M., Vázquez Trejo, J.A., García Beltrán, C.D., and García Morales, J. (2021). Robust observer-based leader-following consensus for multi-agent systems. *IEEE Latin America Transactions*, 19, 1949–1958.

Vazquez Trejo, J.A., Rotondo, D., Adam Medina, M., and Theilliol, D. (2021). Robust observer-based leader-following consensus for a class of nonlinear multi-agent systems: application to uav formation control. In *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1565–1572. IEEE.

Xiong, R., Yu, Q., Shen, W., Lin, C., and Sun, F. (2019). A sensor fault diagnosis method for a lithium-ion battery pack in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 9709–9718. doi:10.1109/TPEL.2019.2893622.

Zhang, H., Zhou, M., and Lan, X. (2019). State of charge estimation algorithm for unmanned aerial vehicle power-type lithium battery packs based on the extended kalman filter. *Energies*, 12(20), 3960.

Ziquan, Y., Zhang, Y., Jiang, B., Jun, F., and Ying, J. (2022). A review on fault-tolerant cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(1), 1–18.

Apéndice A. PARÁMETROS

Tabla 1. Parámetros de los agentes del sistema.

Parámetro	Valor	Unidad
m	1.9	Kg
J_X	21.6×10^{-3}	$kg \times m^2$
J_Y	21.6×10^{-3}	$kg \times m^2$
J_Z	43.2×10^{-3}	$kg \times m^2$
g	9.81	m/s^2
l	0.3	m
J_E	8.3808×10^{-6}	$Nm\ s^2$
b	1.5027×10^{-5}	–
d	1.6497×10^{-5}	–
K_E	0.0104	Nm/A
R	0.2	Ω
T_f	4×10^{-2}	Nm
D_f	2×10^{-6}	$Nm\ s/rad$
K_E	0.0104	Nm/A
R	0.2	Ω
T_f	4×10^{-2}	Nm
C_T	22320	F
R_{int}	0.0421	Ω
R_d	0.02370	Ω
C_d	2400	F
n	7	–

ISSN: 2992-8338

Heat transfer in an absorber tube with non-linear boundary conditions: A semi-analytical solution

Roger Cundapí[*,1], Sara L. Moya[*]

**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira CP 62490, México*

Abstract: The heat transfer analysis in a heat absorber tube is the great importance for thermal solar plants. Knowledge of the parameters that influence heat transfer in the tubes helps to propose feasible and safe operating conditions for the best use of solar energy. In addition to evaluating the performance of new designs of a system with a specific purpose. Currently, there are several studies focused on basic aspects of heat transfer in absorber tubes, both experimental and theoretical. However, experimental studies are limited concerning the operating conditions under which they were carried out and the uncertainties associated with the experiment. While many times theoretical studies can reproduce a broader range of operations, they do not always reproduce them with enough approximation nor are they attached to the reality of the phenomenon. The objective of this paper is to show the functionality of the proposed methodology to solve the semi-analytical equation of heat conduction in the metallic absorber, considering non-linear boundary conditions. To do this, two different ways of considering heat losses were compared, which is the term that introduces nonlinearity to the mathematical model. The semi-analytical solution was found to be stable and convergent, therefore, it can be considered as a reference to validate numerical models or calibrate experiments.

Keywords: Steady-state heat conduction, Nonuniform heat flux distribution, separation of variables method, superposition method.

1. INTRODUCCION

Hoy en día la generación directa de vapor (GDV) mediante captadores solares cilindroparabólicos (CCPs) ha tenido mucho crecimiento debido al gran potencial, madurez y rentabilidad que ha demostrado tener. Las aplicaciones de la energía solar son bastas, pero sobresalen la generación de energía eléctrica (Sallam et al., 2019) y el calor de proceso industrial (Cundapí et al., 2017). Entre los aspectos más importantes por analizar se encuentran la transferencia de calor y la eficiencia térmica del tubo absorbedor. De hecho, el absorbedor es el elemento más importante desde el punto de vista térmico, ya que en él se lleva a cabo la conversión de energía solar a térmica. Así, el análisis de la transferencia de calor en un tubo absorbedor es de gran importancia ya que permite conocer los parámetros que influyen sobre la transferencia de calor en los tubos y proporciona información que ayuda al desarrollo de propuestas sobre condiciones de operación factibles para un mejor aprovechamiento de la energía solar libre de riesgo.

Por lo tanto, es de sumo interés conocer la distribución de la temperatura en el tubo metálico a causa de la distribución no uniforme de la radiación solar sobre él.

Uno de los primeros estudios que se realizaron tomando en cuenta la distribución no uniforme de flujo de calor (DNUFC) sobre un tubo absorbedor fue desarrollado por Heidemann et al. (1992), quienes mediante la técnica de diferencias finitas encontraron la distribución circunferencial de la temperatura sobre el absorbedor sin considerar el comportamiento termohidráulico del fluido al interior. Posteriormente surgieron diferentes trabajos numéricos, entre los más actuales son los realizados por Pal y Kumar (2022); Sandá et al. (2023, 2021); Serrano-Aguilera et al. (2014), entre otros. Estos autores realizaron estudios numéricos desarrollando un código computacional o utilizando un software comercial. Es de resaltar que en estos estudios la mayor temperatura en el tubo se obtiene en la zona de mayor concentración de calor, lo cual era de esperarse.

Por otra parte, Khanna et al. (2015) desarrollaron una solución analítica para determinar la distribución de temperatura en el tubo absorbedor en estado estacionario. Sin embargo, no aplicaron una distribución del tipo LCR (Razón de Concentración Local) en su modelo, sino una distribución gaussiana. Además, consideraron las pérdidas de calor, variables en la dirección circunferencial, aplicando una aproximación para eliminar la no linealidad de la condición de frontera. Cundapí et al. (2021) desarrollaron una solución analítica, en estado

[1] Autor correspondiente. e-mail: roger.cap@cenidet.tecnm.mx.

ISSN: 2992-8338

transitorio, obteniendo una buena comparación con datos experimentales de la literatura. Sin embargo, las pérdidas de calor fueron consideradas a través de una eficiencia global del absorbedor, lo cual disminuyó el flujo de calor proporcionalmente. Así que, ninguna de las dos soluciones analíticas incluye la distribución circunferencial de las pérdidas de calor dependientes de la temperatura.

Con base a la revisión de literatura, no existe una solución analítica o semi-analítica que permita resolver el problema de conducción de calor considerando simultáneamente la distribución de calor y pérdidas de calor no uniformes en la dirección azimutal, para estado estacionario o transitorio. En este trabajo se propone una metodología para la solución semi-analítica de la conducción de calor en estado estacionario con condiciones de frontera no lineales y de esta manera extender la aplicabilidad de las soluciones analíticas en estado estacionario.

Este trabajo muestra que es factible aplicar una metodología iterativa a la solución analítica para resolver la no linealidad de la condición de frontera, la cual involucra a las pérdidas de calor al ambiente. Este trabajo contribuye en una solución de referencia para validar estudios numéricos o para calibrar pruebas experimentales.

2. MODELO CONCEPTUAL Y MATEMÁTICO

En esta sección se presentan las consideraciones y simplificaciones hechas al problema a resolver (Sección 2.1). En las Secciones 2.2–2.4 se incluyen todo lo referente a la modelación matemática.

2.1. Modelo conceptual

En este artículo se estudia la transferencia de calor estacionaria en el tubo metálico, de un absorbedor de un CCP, completamente homogéneo y con sección transversal constante. Dicho tubo recibe flujo de calor sobre la pared exterior de manera no uniforme en la dirección circunferencial (ver Figura 1).

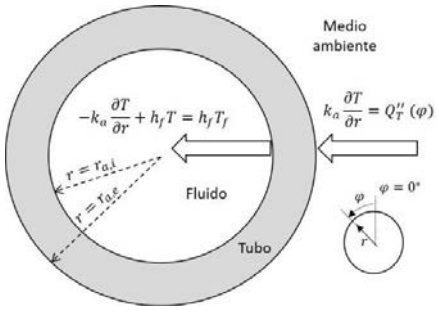


Figura 1. Absorbedor metálico con flujo de calor sobre la pared externa y convección forzada al interior.

Por otra parte, el flujo de calor se considera uniforme en la dirección axial. Mientras que al interior fluye un fluido monofásico, el cual refrigera al tubo metálico y se considera que tanto el coeficiente de transferencia de calor como la temperatura del fluido al interior son constantes en la dirección circunferencial.

El fluido en el interior se considera que tiene un comportamiento lineal en la temperatura y el coeficiente de transferencia de calor.

2.2. Ecuación de conducción de calor

La ecuación de conducción de calor en estado estacionario en 2D (r,φ) para un tubo con sección circular constante y conductividad térmica constante está dada por la Ecuación (1). Cabe destacar que se hace un barrido en la dirección axial para obtener el campo de temperaturas en 3D del absorbedor.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_a r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(k_a\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)=0 \tag{1}$$

Donde T es la temperatura del tubo en K, r y φ son las coordenadas radial y angular en m y rad, respectivamente; y k_a es la conductividad térmica del material en W/m-K.

La Ecuación (1) está sujeta a las condiciones de frontera físicas (2)–(3) y de periodicidad (4)–(5).

$$-k_a\frac{\partial T}{\partial r}+h_fT=h_fT_f \quad \text{en } r=r_{a,i} \text{ y } 0\le\varphi\le 2\pi \tag{2}$$

$$k_a\frac{\partial T}{\partial r}=Q_T''(\varphi) \quad \text{en } r=r_{a,e} \text{ y } 0\le\varphi\le 2\pi \tag{3}$$

$$k_a\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\varphi=0}=k_a\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\varphi=2\pi} \text{ en } \varphi=0 \text{ y } r_{a,i}<r<r_{a,e} \tag{4}$$

$$k_a\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\varphi=0}=k_a\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\varphi=2\pi} \text{ en } \varphi=2\pi \text{ y } r_{a,i}<r<r_{a,e} \tag{5}$$

Donde $r_{a,i}$ y $r_{a,e}$ son los radios interno y externo, respectivamente, ambos en m. Q_T'' es el flujo de calor total que llega a la tubería en W/m^2, h_f es el CTC del fluido en W/m^2-K y T_f la temperatura del fluido en K.

2.3. Flujos de calor en el tubo absorbedor

La condición de frontera de la Ecuación (3) involucra el flujo de calor neto que llega a la tubería, pero para obtenerlo primero se determina la radiación solar incidente (Q''_{solar}), la cual toma en cuenta la radiación solar directa (DNI) en W/m^2, el coseno del ángulo de incidencia (θ_{inc}), el modificador del ángulo de incidencia, la eficiencia óptica pico, el factor de limpieza y el LCR, como lo muestra la Ecuación (6).

$$Q''_{solar}(\varphi)=DNI\cos\theta_{inc}\,K(\theta_{inc})\eta_{opt,0°}F_eLCR(\varphi) \tag{6}$$

Mientras que el flujo de calor neto que llega a la tubería es la diferencia del flujo de calor incidente que llega al tubo absorbedor menos las pérdidas de calor al ambiente (Q''_{loss}) como lo muestra la Ecuación (7).

$$Q_T''(\varphi)=Q''_{solar}(\varphi)-Q''_{loss}(\varphi) \tag{7}$$

Una manera de tomar en cuenta las pérdidas de calor es a través de una ecuación experimental de pérdidas de calor como se muestra en la Ecuación (8), la cual corresponde al sistema DISS (Zarza Moya, 2003).

ISSN: 2992-8338

$$Q''_{loss} = a\Delta T + b\Delta T^2 + c\Delta T^3 \quad (8)$$

Donde los coeficientes a, b y c de la Ecuación (8) están definidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de la Ecuación (8) en función de la temperatura.

T_{abs} (K)	Coeficientes		
	a	b	c
≤ 473.15	0.687257	1.94E − 3	2.6E − 5
$473.15 - 573.15$	1.433242	−5.66E − 3	4.6E − 5
≥ 573.15	2.895474	−16.4E − 3	6.5E − 5

Otra forma de expresar el flujo calor neto que llega a la tubería, es como se muestra en la Ecuación (9).

$$Q''_T(\varphi) = Q''_{solar}(\varphi) \cdot \eta_{term} \quad (9)$$

Donde η_{term} es la eficiencia térmica del absorbedor, la cual toma en cuenta las pérdidas de calor y las relaciona con el flujo de calor solar incidente mediante la Ecuación (10).

$$\eta_{term} = \frac{Q''_{solar} - Q''_{loss}}{Q''_{solar}} \quad (10)$$

2.4. *Distribución no uniforme del flujo de calor*

Para tomar en cuenta la distribución no uniforme del flujo de calor se considera el algoritmo de Cundapí et al. (2021), que interpola entre los datos discretos y trata al perfil LCR (ver Figura 2).

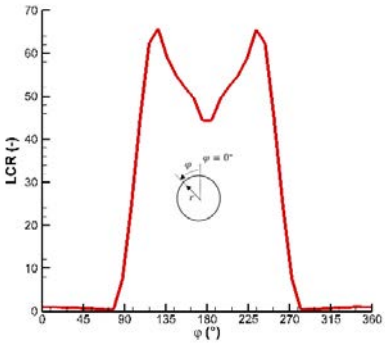


Figura 2. Perfil LCR considerado para la DNUFC obtenido con SolTrace (Wendelin et al., 2013) para el LS-3.

3. SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para resolver el modelo matemático, se hace uso del principio de superposición (Sección 3.1) con la finalidad de separar este problema complejo en dos problemas más sencillos. Posteriormente, cada problema se resuelve con el método de separación de variables (Sección 3.2), y la solución final se obtiene sumando ambas soluciones.

3.1. *Principio de superposición*

Las Ecuaciones (1)–(5) involucran dos condiciones de frontera no homogéneas, lo cual conlleva a aplicar el principio de superposición para separar dicho problema en dos partes, cada una con una condición de frontera no homogénea, para después sumar ambas soluciones (Hahn y Özişik, 2012). En la Figura 3 se muestra este principio en forma esquemática.

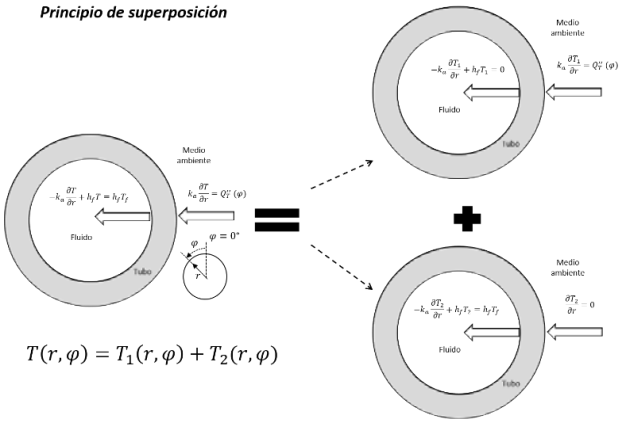


Figura 3. Principio de superposición.

3.2. *Método de separación de variables*

Al aplicar el principio de superposición, surgen dos problemas del tipo Sturm-Liouville (Hahn y Özişik, 2012). Estos se resuelven de manera individual utilizando el método de separación de variables y después se suman ambas soluciones para obtener la solución del problema general, es decir, la solución analítica del problema de conducción de calor en estado estacionario con condiciones de frontera no homogéneas. La solución general está representada por la Ecuación (11), la cual ya ha sido obtenida en un trabajo previo (Cundapí et al., 2021), pero en este trabajo se simplifica considerando que la temperatura del fluido al interior es constante en la dirección circunferencial.

$$\begin{aligned} T(r,\varphi) &= T_f + \frac{r_{a,e}}{2\pi r_{a,i} h_f k_a}\left(k_a + r_{a,i}h_f \ln\frac{r}{r_{a,i}}\right)\int_{\varphi'=0}^{2\pi} Q''_T(\varphi')d\varphi' \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{r_{a,e}}{\pi k_a n}\frac{(k_a n + r_{a,i}h_f)r^n + r_{a,i}^{2n}(k_a n - r_{a,i}h_f)r^{-n}}{(k_a n + r_{a,i}h_f)r_{a,e}^n - r_{a,i}^{2n}(k_a n - r_{a,i}h_f)r_{a,e}^{-n}} \cdot \int_{\varphi'=0}^{2\pi} Q''_T(\varphi')\cos n(\varphi-\varphi')\,d\varphi'\right] \end{aligned} \quad (11)$$

Donde *n=0, 1, 2, …*

La demostración teórica del balance de los flujos de calor entre lo que incide sobre el tubo y lo que se transmite al fluido puede consultarse en (Cundapí et al., 2021).

ISSN: 2992-8338

3.3. *Metodología de la solución semi-analítica*

En general, la solución obtenida en la Ecuación (11) es semi-analítica por el hecho de tener una integral definida y una sumatoria infinita que podrían no tener una solución explícita y obliga a una solución numérica. Por otra parte, las pérdidas de calor dependen de la temperatura del tubo, lo que hace que la condición de frontera sea no lineal, ya que no es conocida. Por lo tanto, la metodología propuesta conlleva a la iteración de esta solución semi-analítica hasta que la temperatura de la pared converja como se muestra en la condicional de la Figura 4.

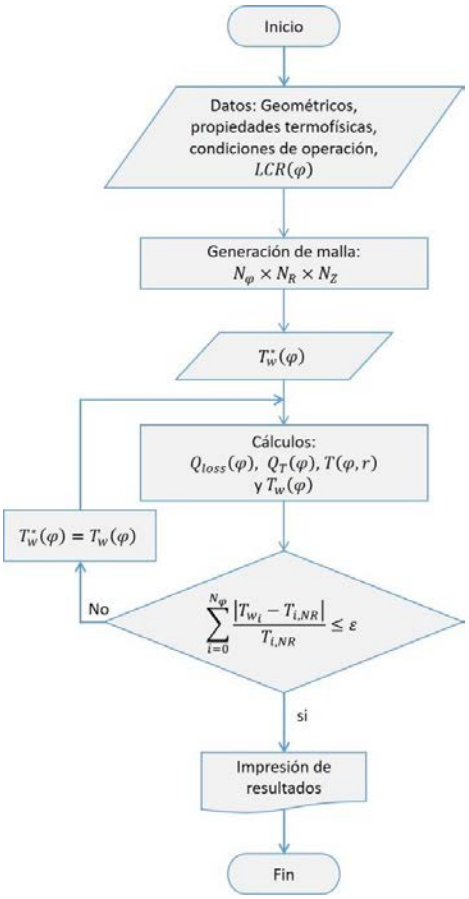


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo semi-analítico (traducido de Cundapí et al., 2021).

La metodología de solución propuesta aplica métodos numéricos para la integral definida, un criterio de residual para el término de la sumatoria y un método iterativo para la no linealidad de la condición de frontera en la pared externa del tubo absorbedor.

4. VERIFICACIÓN

En este artículo se analizan dos casos para la consideración de las pérdidas de calor en el absorbedor: en el caso 1 se considera la ecuación experimental de pérdidas de calor. En el caso 2 se toma un valor de eficiencia constante (a partir del caso 1) determinada teóricamente mediante la Ecuación (10).

Los datos considerados para el problema se presentan en las Tablas 2 y 3. Los cuales toman como base el estudio de Serrano-Aguilera et al. (2014) y Sandá et al. (2021). Además, se proponen las funciones de la temperatura y el CTC del vapor sobrecalentado en función de la longitud axial de la tubería (ver Tabla 3). Cabe destacar que la función de la temperatura en virtud de la longitud se tomó de una linealización de la temperatura de entrada y salida del caso 1 de Serrano-Aguilera et al. (2014) obtenida en el trabajo de Cundapí et al. (2021), y lo mismo se hizo con el CTC. Lo anterior se llevó a cabo con la finalidad de extender un poco más el análisis del trabajo previo, pero evitando involucrar el modelo termohidráulico.

Tabla 2. Parámetros de diseño del captador.

Parámetro (Unidad)	**Valor**
Longitud (m)	4.06
Apertura (m)	5.76
Diámetros interno/externo (m)	0.05/0.07
Conductividad térmica (W/m-K)	38
Modificador del ángulo de incidencia (-)[2]	$1 - 1.88 \cdot 10^{-3}\theta_{inc} - 1.49206 \cdot 10^{-4}\theta_{inc}^2$
Factor de ensuciamiento (-)	0.98
Factor de interceptación (-)	0.95
Reflectividad (-)[3]	0.86
Transmisibilidad (-)	0.95
Absortividad (-)	0.94

Tabla 3. Condiciones de sitio y operación

Parámetro (Unidad)	**Valor**
Ángulo de incidencia (°)	14.7
DNI (W/m^2)	921
Temperatura ambiente (K)	398.15
Temperatura media del fluido (K)	562.6
Función de la temperatura del fluido (K)	$\frac{5.2}{4.06}x + 560$
CTC medio (W/m^2-K)	1651.26
Función del CTC (W/m^2-K)	$-\frac{50.06}{4.06}x + 1676.29$

En la Figura 6 se hace una comparación del perfil azimutal de la temperatura de la pared externa del tubo a la salida. Se observa que la solución con ambos casos son bastantes congruentes entre sí. De hecho, para el caso 1, las pérdidas de calor son mayores en la zona de mayor concentración debido a la mayor temperatura en esa zona lo cual concuerda con la Ecuación (10).

[2] El ángulo se introduce en grados.

[3] Para el caso 1 de Serrano et al. (2014)

ISSN: 2992-8338

Mientras que las pérdidas son menores en la zona de menor concentración por la menor temperatura alcanzada. Sin embargo, cuando se considera el caso 2 (una eficiencia promedio), subestima ligeramente la temperatura en la zona de mayor concentración y sobreestima la temperatura en la zona de menor concentración. Lo anterior es congruente con la modelación matemática, ya que el caso 2 es un promedio entre todo el rango de eficiencias (de menor en la zona de mayor concentración a mayor en la zona de menor concentración). Por otra parte, el comportamiento de la temperatura con ambos casos es similar a obtenidos por Serrano-Aguilera et al. (2014). Cabe resaltar que las diferencias obtenidas se deben a la correlación del CTC empleada y que este estudio no incluye la cubierta de vidrio.

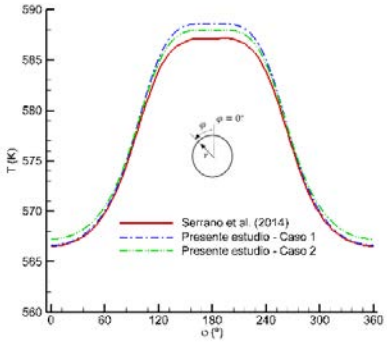


Figura 5. Comparación del perfil circunferencial de temperatura interior en la salida del tubo para ambos casos considerados.

5. RESULTADOS

En este estudio se comparó el caso de usar propiedades termofísicas constantes contra el caso de utilizar propiedades termofísicas variables en dirección axial, con la finalidad de probar la metodología de la solución semi-analítica. Además, se compararon los casos 1 y 2 de la consideración de las pérdidas de calor.

5.1. Perfiles de temperatura con propiedades del fluido constantes en la dirección axial

En la Figura 6 se presentan los perfiles de temperatura axial de la pared externa del tubo absorbedor en 0°, 90° y 180° para ambos casos. Se observa que debido a que la temperatura y el CTC del fluido son constantes, la temperatura tiene un comportamiento constante, ya que el flujo de calor es constante a lo largo de la dirección axial, lo cual es de esperarse. Otra cosa que se observa en la Figura 6 es que la temperatura del tubo a los 0° es menor cuando la eficiencia es constante (caso 2) ya que es un promedio, y no es afectada por la temperatura de la pared. Pero considerando la ecuación experimental de pérdidas de calor, estas son menores ya que la temperatura de la pared es menor que la temperatura promedio, obteniendo menos pérdidas de calor como se observa en la Figura 6. Caso contrario ocurre en 180°, ya que la eficiencia del caso 2 será mayor que la eficiencia del caso 1. De acuerdo a lo anterior también se observa que para 90° las temperaturas de ambos casos están muy próximas, ya que, en este punto del tubo, la eficiencia térmica del caso 1 se asemeja a la eficiencia obtenida con la temperatura de la pared a los 90°.

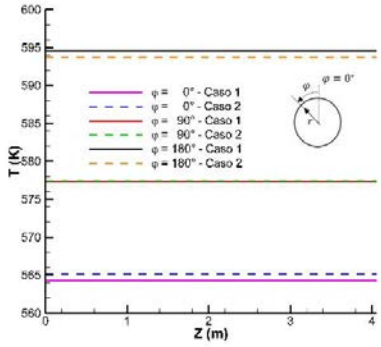


Figura 6. Perfiles axiales de temperatura en la pared exterior del tubo considerando propiedades termofísicas constantes.

5.2. Perfiles de temperatura con propiedades del fluido variables en la dirección axial

En la GDV ni la temperatura del fluido ni del coeficiente de transferencia de calor son constantes en la dirección axial, y por lo tanto se considera un perfil axial de temperatura y del CTC de la Tabla 3, y se observa que los resultados cambian completamente (ver Figura 7). Ya no se tienen temperaturas constantes en la dirección axial. Particularmente, las temperaturas del tubo con el caso 1 incrementa con una menor pendiente que las temperaturas del caso 2. Primeramente, ambos casos incrementan debido a que temperatura del fluido incrementa, y la pared del tubo debe mantenerse arriba de ese valor, y segundo el CTC disminuye en dirección axial.

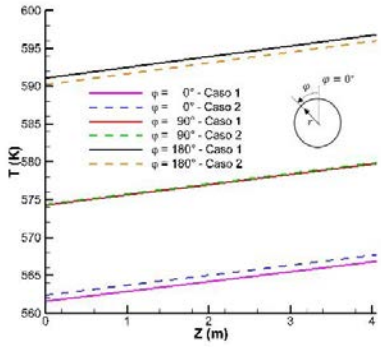


Figura 7. Perfiles axiales de temperatura del tubo en la pared exterior considerando propiedades variables del fluido.

Ahora bien, el incremento de una menor pendiente del caso 1 en 180° se debe precisamente a que como la temperatura de la pared incrementa en dirección axial debido a la concentración solar, las pérdidas son mayores y por lo tanto su incremento en dirección axial disminuye.

ISSN: 2992-8338

5.3. Perfiles axiales de gradientes de temperatura entre 180° y 0°

A continuación, se presentan los perfiles axiales de los gradientes térmicos entre 180° y 0°. Los gradientes térmicos son determinados considerando ambos casos con propiedades variables en la dirección del fluido.

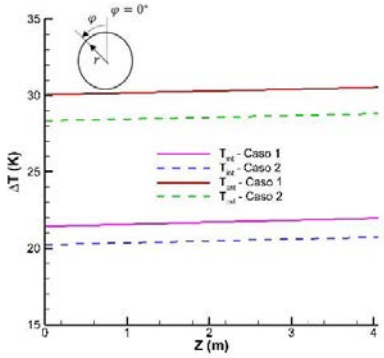


Figura 8. Perfil axial de gradientes térmicos con propiedades variables del fluido para ambos casos y paredes interna y externa del tubo.

Como se observa en la Figura 8 en la superficie externa se da las mayores diferencias de temperatura, ya que en el interior se tiene un fluido en convección forzada que ayuda a refrigerar la tubería. Los gradientes térmicos crecen conforme se avanza en la longitud axial debido a que el CTC disminuye en la dirección axial. Con el caso 1 se alcanzan mayores gradientes de temperatura con respecto al caso 2 debido a que el caso 1 presenta mayores temperaturas en zona de concentración (180°) y menores temperatura en la zona de no concentración (0°), con respecto al caso 2. Lo anterior puede apreciarse en la Figura 7.

6. CONCLUSIONES

La metodología de la solución semi-analítica proporcionó soluciones fiables para los casos en los que las condiciones de frontera son dependientes de la temperatura. Esta metodología provee de un punto de referencia para esquemas numéricos y calibración de pruebas experimentales. Por otra parte, también es capaz de considerar propiedades variables del fluido en dirección axial.

Respecto al caso de considerar una ecuación de pérdidas de calor que permita evaluarlas en la dirección circunferencial, el código desarrollado presentó estabilidad y el consumo de tiempo de cómputo no fue considerablemente mayor respecto a un valor constante de eficiencia térmica del CCP. De hecho, debido a que la eficiencia térmica fue determinada a partir de las pérdidas de calor obtenidas en el caso 1, los resultados entre ambos casos fueron muy próximos entre sí, y además mostraron congruencia con la física del problema.

7. REFERENCIAS

Cundapí, R., Moya, S.L., Cazarez, O., 2021. Analytical Solution of the Transient Heat Conduction in the Absorber Tube of a Parabolic Trough Solar Collector Under Quasi-Steady Conditions. J. Sol. Energy Eng. 143, 1–43. https://doi.org/10.1115/1.4048549

Cundapí, R., Moya, S.L., Valenzuela, L., 2017. Approaches to modelling a solar field for direct generation of industrial steam. Renew. Energy 103, 666–681. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.081

Hahn, D.W., Özişik, M.N., 2012. Heat Conduction, Third Edit. ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Heidemann, W., Spindler, K., Hahne, E., 1992. Steady-state and transient temperature field in the absorber tube of a direct steam generating solar collector. Int. J. Heat Mass Transf. 35, 649–657. https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90124-B

Khanna, S., Singh, S., Kedare, S.B., 2015. Explicit expressions for temperature distribution and deflection in absorber tube of solar parabolic trough concentrator. Sol. Energy 114, 289–302. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.044

Pal, R.K., Kumar, K.R., 2022. Effect of position of heat flux profile on the absorber surface of parabolic trough solar collector for direct steam generation. J. Energy Syst. 6, 46–61. https://doi.org/10.30521/jes.952658

Sallam, S., Taqi, M., Belouaggadia, N., 2019. Analysis of Pressure Drop in a Concentrated Solar Collector with Direct Steam Production. Int. J. Energy Environ. Eng. 13, 524–528.

Sandá, A., Moya, S.L., Valenzuela, L., Cundapí, R., 2023. Coupling of 3D thermal with 1D thermohydraulic model for single-phase flows of direct steam generation in parabolic-trough solar collectors. Appl. Therm. Eng. 22, 120614. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120614

Sandá, A., Moya, S.L., Valenzuela, L., Cundapí, R., 2021. Three-dimensional thermal modelling and heat transfer analysis in the heat collector element of parabolic-trough solar collectors. Appl. Therm. Eng. 189, 1–59. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116457

Serrano-Aguilera, J.J., Valenzuela, L., Parras, L., 2014. Thermal 3D model for direct solar steam generation under superheated conditions. Appl. Energy 132, 370–382. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.035

Wendelin, T., Dobos, A., Lewandowski, A., Wendelin, T., Dobos, A., 2013. SolTrace : A ray-tracing code for complex solar optical systems. Colorado. https://doi.org/10.2172/1260924

Zarza Moya, E., 2003. Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos. Proyecto DIrect Solar Steam (DISS). Universidad de Sevilla.

ISSN: 2992-8338

Annual Energy Generation Study of a Photovoltaic Panel in a Warm-Subhumid Climate

Miguel A. Chagolla-Aranda* Miguel A. Chagolla-Gaona E. Simá* S. López Salazar***

**Tecnológico Nacional de México /CENIDET*
(Tel: 777 362 7770, ext:414; e-mail: miguel.ca@cenidet.tecnm.mx, e.sima@cenidet.tecnm.mx, d18ce057@cenidet.tecnm.mx).

***Tecnológico Nacional de México / IT Zacatepec*
(e-mail: miguel.cg@zacatepec.tecnm.mx).

Abstract: Diverse technologies take advantage of renewable energy to reduce associated problems such as high electricity consumption and environmental impact. Photovoltaic panels are an increasingly used renewable energy generation alternative, however, it is essential to study them in various operating conditions, as well as the main variables that affect their efficiency. For this, software has been developed that allows the simulation of electrical energy generation from photovoltaic panels. The validation of the simulation of a photovoltaic panel was carried out with TRNSYS and the annual simulation of the electrical energy generation was carried out in a warm-subhumid climate corresponding to the city of Zacatepec, Morelos. The main objective of this work is to show the influence of climatic variables on the annual electrical energy generation from a photovoltaic panel in Mexico. The results of this work show that in August the highest average solar radiation was present, and the highest generation was also obtained with 13 kW·h, however, the month with the lowest average solar radiation did not present the lowest generation, because of ambient temperature on panel temperature and its effect on panel efficiency. Due to the importance of the effect of temperature on the efficiency of photovoltaic panels, the study of passive techniques is suggested that allow them to be kept at a temperature that improves their efficiency.

Keywords: Photovoltaic Panels, Energy Generation, Climate Variables, Renewable Energy.

Nomenclatura		
E	Energía eléctrica	kW · h
G	Radiación solar	W/m^2
I	Corriente	A
I_D	Corriente a través del diodo	A
I_L	Corriente generada	A
I_{mp}	Corriente de máxima potencia	A
k	Constante de Boltzmann	J/°C
n	Número máximo de datos	
P	Potencia	W
q	Constante de carga del electrón	
R_s	Resistencia interna en serie	Ω
t	Tiempo	h
T	Temperatura	°C
T_c	Módulo de temperatura	°C
V	Voltaje	V
V_{mp}	Voltaje de máxima potencia	V
x	Valor experimental	
y	Valor calculado	
Δ	Incremento	
γ	Parámetro empírico de ajuste de la curva PV	V

1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética, la contaminación medioambiental y el calentamiento global son problemáticas importantes en la actualidad. En atención a estos problemas, las energías renovables, como la solar, eólica, hídrica y de biomasa son cada vez más exploradas como soluciones potenciales para hacer frente a este grave dilema energético y medio ambiental (Ma T. et al., 2014). Entre los diferentes tipos de energías renovables, los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) son considerados como una de las tecnologías más prometedoras debido a que la radiación solar es uno de los recursos más abundantes (Fara L. et al., 2017). La eficiencia de los SFV depende de múltiples factores; como la radiación solar, la temperatura, el efecto de envejecimiento debido a la degradación, entre otros. En general, las variaciones de la radiación solar y la temperatura son consideradas como los factores que afectan en mayor medida la generación en los SFV (Pendem S.R. et al., 2018).

Para garantizar una mayor fiabilidad y viabilidad económica de un SFV, se requiere del diseño y simulación de los SFV. El

ISSN: 2992-8338

modelado y simulación de los SFV es necesario para entender el comportamiento dinámico del sistema. Existen algunos softwares que simulan la generación de energía en los SFV, como es el caso de TRNSYS (TRNSYS, 2023). Este software considera las dos principales variables que afectan la generación energía en su modelo matemático, la radiación solar y la temperatura ambiente. Los SFV disminuyen su eficiencia a medida que la temperatura de estos aumenta, por lo que considerar esta variable en el cálculo de la energía eléctrica generada es deseable. Además, cuenta con un enfoque que permite realizar cálculos horarios que muestran un comportamiento más real de los SFV (Riza D.F. et al., 2010). A continuación, se mencionan algunos trabajos que validan a TRNSYS como una herramienta capaz de simular SFV. Mohammad R. et al. (2019) utilizaron el software TRNSYS para validar los resultados obtenidos de un estudio sobre el uso de materiales de cambio de fase (PCM) para aumentar la potencia eléctrica de SFV. El uso de TRNSYS ayudó a demostrar que el uso de PMC logró aumentar la potencia de un SFV en un 24.68%. Quesada B. et al. (2011) realizaron la validación de la simulación de un SFV con TRNSYS, para después calcular la energía eléctrica generada por un periodo de quince meses en Valencia, España. El trabajo se enfoca en el estudio de los efectos de las diversas variables que afectan la potencia calculada en el SFV, siendo las variables meteorológicas de la radiación solar incidente en el panel y la temperatura ambiente de las más importantes. Existen otros softwares que permiten el cálculo de la energía eléctrica generada por SFV, entre los que se encuentra PVSOL. Dehwah A.H.A. y Asif M. (2019) realizaron un estudio teórico utilizando el software PVSOL sobre la capacidad de generación de energía eléctrica de SFV colocados en los techos de edificaciones ubicadas en una región de 100 km^2, en un clima desértico-cálido. Los autores concluyen solo es conveniente utilizar SFV en hasta el 28% de las viviendas debido a las características geográficas y las características de las edificaciones, teniendo una capacidad de generación anual de hasta 797 GW·h. Kanyarusoke K. et al. (2016) validaron la simulación de un SFV con TRNSYS utilizando datos experimentales de Ciudad del Cabo, Sudáfrica. Una vez validada la simulación del SFV, se realizó una simulación de la energía eléctrica generada por un SFV utilizando las variables climatológicas de una estación meteorológica ubicada en sitio y otra con datos obtenidos de los archivos de clima que proporciona TRNSYS correspondientes a una estación meteorológica cercana. Ambas simulaciones mostraron resultados similares, que permitieron concluir que los datos de clima reportados en TRNSYS permiten obtener resultados confiables para esa región. Los estudios realizados sobre el cálculo o estimación de la generación de energía fotovoltaica en el mundo (Urbano et al., 2014), utilizan generalmente dos metodologías, que se pueden considerar como simplificadas y especializadas. Las simplificas consideran como factor principal para el cálculo de la generación de energía a la radiación solar obtenida de datos satelitales, como lo es el caso de la hora pico solar (SPH). Las metodologías especializadas consideran datos climáticos horarios y consideran múltiples variables como la radiación solar, la temperatura ambiente y la humedad para la estimación de la irradiancia incidente en el panel. Estas últimas metodologías han probado tener mejores resultados al ajustarse con los datos experimentales, en comparación con las metodologías simplificadas. Los estudios donde se reportan resultados con el uso de las metodologías especializadas en diversos climas son escasos, sin embargo, existen diversas herramientas que permiten desarrollar los cálculos (Milosavljević et al., 2022). La mayoría de los trabajos reportados a nivel mundial sobre la generación de energía con paneles fotovoltaicos utilizan metodologías simplificadas (Rosas-Flores et al., 2019). El trabajo reportado por Kanyarusoke et al. (2016) es el único trabajo encontrado en el que se reporta la generación de un sistema fotovoltaico utilizando una metodología especializada para un periodo de hasta un año, con el uso del software TRNSYS. El uso de las dos metodologías se considera adecuado para el cálculo de la energía generada, sin embargo, debido a las diferencias en las características de los modelos que se proponen estas pueden tener resultados con diferencias que no han sido reportados de forma clara en la literatura.

En México se han reportado resultados sobre el cálculo de la generación de energía fotovoltaica, pero hasta el momento solo se ha encontrado un trabajo realizado por Tariq et al. (2020) en el que utilizan una metodología especializada, con resultados para tres tipos de climas y con la inclusión de un material de cambio de fase. En general la mayoría de los trabajos encontrados utilizan metodologías simplificadas [Medrano et al. (2022), Acosta et al. (2022), Velázquez (2020), Ramos et al. (2019)]. En este trabajo se utiliza una metodología especializada con el uso del software TRNSYS para el cálculo de la generación anual de energía con datos climatológicos obtenidos en sitio en Zacatepec, Morelos. Los resultados obtenidos pueden ayudar a tomar decisiones sobre proyectos fotovoltaicos con información confiable sobre la generación de energía en un periodo anual.

2. MODELO DE SIMULACIÓN EN TRNSYS

2.1 Componentes de TRNSYS

El software TRNSYS V17 contiene diversas librerías denominadas Types, que permiten la simulación de diversos tipos de sistemas dentro de los que se encuentran los SFV. Los principales Types utilizados para realizar la simulación de un panel fotovoltaico son el procesador de radiación (Type 16) y el modelo de panel fotovoltaico (Type 94).

2.2 Procesador de radiación solar

El Type 16 tiene la finalidad de calcular la radiación solar incidente en una superficie inclinada, que en este caso representa un panel fotovoltaico. El cálculo se realiza utilizando variables meteorológicas que son generalmente obtenidas de estaciones meteorológicas automáticas (EMA); estas son la radiación horizontal global (G), la temperatura ambiente (T_{amb}) y la humedad relativa (HR).

2.3 Modelo de solución del Panel fotovoltaico

El type 94 resuelve un modelo matemático de un panel fotovoltaico basado en un circuito equivalente de un diodo como se muestra en la Figura 1. La variable de interés en el modelo es la corriente del circuito que se puede expresar como

ISSN: 2992-8338

$$I = I_L - I_D \left[exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right]$$

El modelo considera que la pendiente de la curva corriente-voltaje es cero en condición de corto circuito. Esta es una consideración que se aproxima al comportamiento que se tiene en los paneles fotovoltaicos cristalinos. Para la solución del modelo se requieren los datos técnicos del panel fotovoltaico, la radiación solar incidente y la temperatura ambiente. El software resuelve el modelo de tal forma que se obtiene la máxima potencia del SFV, que depende de la combinación de la corriente máxima (I_{mp}) y del voltaje máximo (V_{mp}).

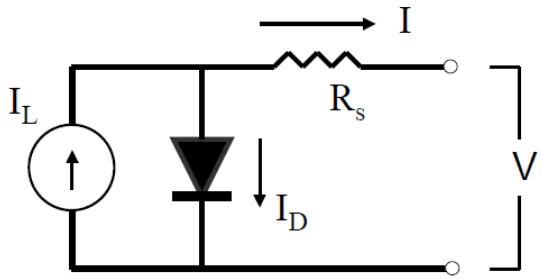


Figura 1. Representación de panel fotovoltaico mediante un circuito equivalente de un diodo.

3. PRUEBA EXPERIMENTAL

3.1 Diseño del experimento

Se realizó un experimento que tenía el objetivo de medir la potencia máxima generada por un panel fotovoltaico, así como la radiación solar incidente en el panel y la temperatura ambiente, datos necesarios para realizar la simulación de este mediante TRNSYS.

3.2 Instrumentación

Se utilizó un panel fotovoltaico Enesol 80W, la Tabla 1 muestra sus especificaciones.

La medición de la radiación solar se realizó con un piranómetro Kipp & Zonen CMP3 con una incertidumbre menor al 5% de la medición. La potencia máxima generada por el panel fotovoltaico se midió con un multímetro Elejoy EY800W. La temperatura del ambiente se midió con sensor de temperatura HOBO UX100-003, con una incertidumbre de ±0.21 °C.

Tabla 1. Especificaciones del panel fotovoltaico.

Descripción	Valor
Tipo	Policristalino
Potencia máxima	80 W
Voltaje a máxima potencia	18 V
Corriente a máxima potencia	4.45 A
Voltaje de circuito abierto	21.6 V
Corriente de corto circuito	4.88 A
Dimensiones	768 x 664 x 30 mm

El panel fotovoltaico se colocó orientado hacia el sur, con una inclinación del 18.92°, inclinación correspondiente a la latitud del sitio. El piranómetro se montó sobre la misma estructura de aluminio que sostenía al panel y con la misma inclinación. El sensor de temperatura se colocó a tres metros del panel a una altura de dos metros. La prueba experimental se realizó el 18 de mayo de 2023, en la ciudad de Zacatepec, Morelos. Los datos de cada variable se registraron cada 15 min.

4. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DEL PANEL FOTOVOLTAICO

4.1 Datos de clima

Los datos de clima que se muestran en la Figura 2 corresponde a los datos horarios registrados el día de la prueba experimental desde las 8:00 a las 17:30 h, periodo durante el que se registró radiación solar. La radiación solar máxima fue de 870 W/m^2 y la temperatura ambiente promedio fue de 35.1 °C.

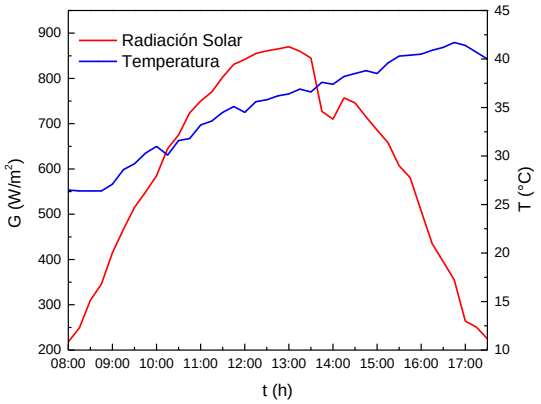


Figura 2. Variables climatológicas del periodo experimental.

4.2 Validación de la simulación, potencia máxima

Los datos de las especificaciones del panel fotovoltaico y de las variables climatologías se ingresaron al software para realizar la simulación y calcular la máxima potencia generada. Los resultados obtenidos se compararon con los resultados experimentales (Figura 3), con la finalidad de validar el uso adecuado del software. La diferencia porcentual promedio fue menor al 10%.

El parámetro estadístico utilizado para estimar el error entre los datos experimentales y numéricos fue la raíz del error cuadrático medio (*RECM*) expresada como:

$$RECM = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - y_i)^2}{n}}$$

Se obtuvo un *RECM* de 3 W, lo que implica un 4% de la potencia máxima del panel, por lo que se considera un adecuado uso del software.

ISSN: 2992-8338

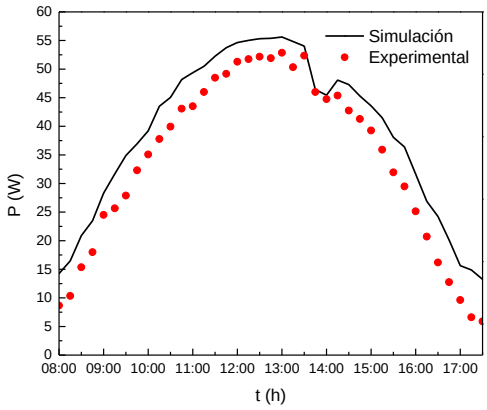


Figura 3. Validación de simulación con datos de prueba experimental.

5. SIMULACIÓN ANUAL

5.1 Datos de la simulación

Una vez validado el uso adecuado del software se realizó la simulación anual de un panel fotovoltaico con datos de clima correspondientes al 2011, de la ciudad de Zacatepec, Morelos. Los resultados de la simulación corresponden a la potencia eléctrica máxima generada cada hora. Los datos del panel fotovoltaico utilizados para esta simulación corresponden a los reportados en la Tabla 1, considerando el mismo panel que se utilizó en la prueba experimental y con la misma inclinación. Se generó un archivo con datos de clima horarios que se ingresó al software para calcular la potencia eléctrica máxima generada por el panel cada hora. En la Tabla 2 se muestran los valores promedio mensuales de las variables climáticas de interés, que para el caso son la radiación solar global horizontal, la temperatura ambiente y la humedad relativa. Estas variables se utilizan en el Type 16 para calcular la radiación solar incidente en el panel. La temperatura ambiente también es utilizada por el Type 94 para calcular la temperatura del panel fotovoltaico. Los meses con la temperatura promedio mensual mayor fueron abril y mayo con 26.9 °C, el mes con la mayor radiación solar promedio fue en agosto con 287 W/m^2. El mes en el que se registró la menor temperatura y radiación promedio mensual fue diciembre con 17.2 °C y 174 W/m^2. La humedad relativa promedio máxima se tuvo en agosto con 78% y la mínima de 39% en marzo.

5.2 Energía eléctrica generada

Para calcular la energía eléctrica generada por el panel fotovoltaico se utilizó la regla del trapecio para calcular el área bajo la curva de la potencia eléctrica-tiempo de cada día obtenida de la simulación anual, como se muestra a continuación

$$\int_0^{24} P(t)dt = \frac{\Delta t}{2}[P(t_0) + 2P(t_1) + 2P(t_2) + \cdots + 2P(t_{n-1}) + P(t_n)]$$

Tabla 2. Datos de clima para la simulación anual.

Mes	T (°C)	HR (%)	G (W/m^2)
Enero	19.1	55	194
Febrero	21.7	47	223
Marzo	24.1	39	256
Abril	26.9	49	266
Mayo	26.9	49	246
Junio	24.8	67	239
Julio	23.3	76	240
Agosto	23.8	78	287
Septiembre	23.6	77	255
Octubre	17.5	56	197
Noviembre	19.2	66	194
Diciembre	17.2	62	174

Al sumar la energía eléctrica diaria generada se obtuvo la energía eléctrica mensual acumulada. La Figura 4 muestra la energía eléctrica mensual calculada, se observa que el mes con mayor generación es agosto con 13 kW·h, siendo también el mes con mayor radiación solar promedio. El segundo mes con mayor generación es marzo con 12 kW·h, pero no el segundo con mayor radiación solar promedio mensual, lo cual muestra que la radiación solar no es el factor determinante en la generación de energía y se puede observar el efecto de la temperatura. En abril, se registró el segundo mayor promedio mensual de radiación solar, pero no ocupó el segundo lugar en generación de energía solar. Esto podría deberse a que abril tiene una temperatura promedio mensual más alta que agosto, que fue el mes con la mayor generación de energía solar, superándolo en 3.1 °C. El mes con menor generación fue junio con 9.7 kW·h, sin embargo, no es el mes con menor radiación solar promedio mensual, la baja generación puede estar asociada a que, si bien la radiación solar es alta, no es constante debido a que en este mes comienza la temporada de lluvia en esta región, asociado también a la elevada temperatura que disminuye la eficiencia. El mes con menor radiación promedio mensual es diciembre, sin embargo, como se mencionó anteriormente, no fue el de menor generación, esto puede estar asociado a la baja temperatura promedio mensual que presenta, siendo el mes con el menor valor de esta variable, lo que pudo haber repercutido en un aumento de su eficiencia. La generación anual de energía eléctrica fue de 131.8 kW·h.

ISSN: 2992-8338

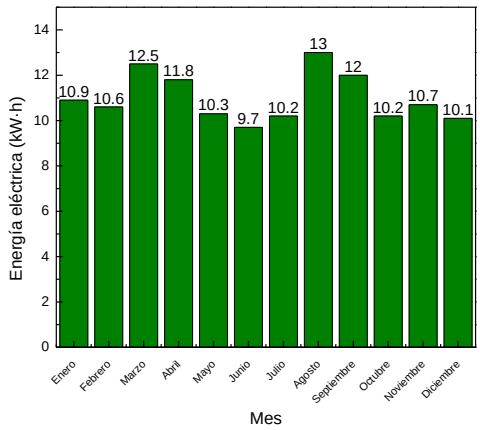


Figura 4. Energía eléctrica mensual acumulada.

6. CONCLUSIONES

Con base en la información presentada se puede concluir que el efecto de la temperatura ambiente es determinante en la generación de energía eléctrica en los paneles fotovoltaicos y que su generación no debe asociarse solamente a la radiación solar. Los resultados de este trabajo muestran que en el caso del mes en el que se presentó la mayor radiación solar promedio también se obtuvo la mayor generación, sin embargo, el mes con la menor radiación solar promedio no presentó la menor generación, esto debido al efecto de la temperatura ambiente en la temperatura del panel y la disminución de la eficiencia de este debido a tal efecto. El uso de modelos matemáticos utilizados en programas de simulación como TRNSYS es una herramienta que permite simular con un grado suficiente de confiabilidad la generación de energía en este tipo de sistemas y su uso debería de ser más amplio para poder proyectar de una forma más clara los resultados de este tipo de sistemas. Debido a la importancia del efecto de la temperatura en la eficiencia de los SFV se sugiere el estudio de técnicas pasivas que permitan mantenerlos a una temperatura que mejore su eficiencia.

REFERENCIAS

Dehwah A.H.A. y Asif M. (2019). Assessment of Net Energy Contribution to Buildings by Rooftop Photovoltaic Systems in Hot-Humid Climates. *Renewable Energy*, 131, 1288-1299.

Fara L. y Craciunescu D. (2017). Output Analysis of Stand-Alone PV Systems: Modeling, Simulation and Control. *Energy Procedia*, 112, 595-605.

Kanyarusoke K., Gryzagoridis J., Oliver G. (2016). Validation of TRNSYS modelling for a fixed slope photovoltaic panel. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24, 4763-4772.o

Ma T., Yang H., Lu L. (2014). Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 304-315.

Pendem S.R. y Mikkili S. (2018). Modeling, simulation and performance analysis of solar PV array configurations (Series, Series–Parallel and Honey-Comb) to extract maximum power under Partial Shading Conditions. *Energy Reports*, 4, 274-287.

Rezvanpour M., Borooghani D., Torabi F., Pazoki M. (2019). Using CaCl2·6H2O as a phase change material for thermo-regulation and enhancing photovoltaic panels' conversion efficiency: Experimental study and TRNSYS validation. *Renewable Energy*, 146, 1907-1921.

Riza D.F., Galani S.I., Aris M.S. (2010). Measurement and Simulation of Standalone Solar PV System for Residential Lighting in Malaysia. *International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications*, *Ghardaïa, Algeria*.

TRNSYS (2023). Transient system simulation tool (TRNSYS), www.trnsys.com (Visitado en noviembre de 2023).

Milosavljević D. D., Kevkić T. S. y Jovanović S. J. (2022). Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. *Open Physics*, 20, 431–451.

Rosas-Flores J. A., Zenón-Olvera E. y Gálvez D.M. (2019). Potential energy saving in urban and rural households of Mexico with solar photovoltaic systems using geographical information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116.

Kanyarusoke K., Gryzagoridis J. y Oliver G. (2016). Validation of TRNSYS modelling for a fixed slope photovoltaic panel. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24, 4763–4772.

Medrano O.R., Carrera A. y Méndez L.P. (2022). Potencial de Generación de la Tecnología Fotovoltaica Flotante en México. ENERLAC, 6, 110-128.

Acosta L.D., García I.A. y Fernández J.L. (2022). Situación actual de la energía solar en Oaxaca, México. En: Sarmiento J.F., Valles M.C. (2022). Escenarios regionales de la dicotomía entre sustentabilidad ambiental y aprovechamiento de los recursos naturales. UNAM-AMECIDER, México. Páginas: 557-570.

Velázquez J.M., Saldaña C.E. y Vázquez L. (2020). Proyecto de paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica. Universo de la Tecnológica, 37, 31-34.

Ramos J.R. y Chávez R. (2019). Consumo energético y económico de las celdas fotovoltaicas en viviendas de estrato social de clase media-alta de Victoria, Tamaulipas México. CIMEXUS, 14, 13-31.

Nevárez M.C., Estrada E., Valles M.C., Manjarrez C. B. y Sigala M.A. (2016). Modelado del potencial fotovoltaico

ISSN: 2992-8338

del estado de Chihuahua. TECNOCIENCIA Chihuahua, 10(3), 154-160.

Tariq R., Xamán J., Bassam A., Ricalde L.J., Escalante M.A. (2020). Multidimensional Assessment of a Photovoltaic Air Collector Integrated Phase Changing Material Considering Mexican Climatic Conditions. Energy, 209, 118304.

ISSN: 2992-8338

Agrivoltaic Parks an Alternative for Energy Transition Applied to the Agriculture

Marcían Adriana García Ávila[1]*, D. Hernández-Castañeda[1], J.F. Gómez-Aguilar[2]

[1]Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. [2]CONAHCyT - Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. Correo electrónico: *m23ce030@cenidet.tecnm.mx

Abstract: In light of the critical need for sustainable energy solutions to mitigate environmental impact, this study investigates an innovative approach that synergizes solar panel technology with agricultural and livestock operations. Utilizing the same land for both solar energy collection and crop cultivation, this method allows for a coexistence that enhances overall productivity. While this dual-use strategy has gained traction in European nations such as France and Spain, its adoption in Latin America remains in nascent stages, with only a few projects underway in Chile and Ecuador. In Mexico, this approach warrants more extensive research and investment. The study posits that this integrated system serves as a model for sustainable agriculture and a strategy to combat climate change.

Keywords: Agrivoltaic Parks, Energy Transition, Solar Energy, Agricultural Use, Clean Energy.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar es una de las más abundantes en el plantea, aún más en las últimas décadas donde la intensidad de la misma parece aumentar en grados y periodos de extensión, sin embargo, las iniciativas para su aprovechamiento parecen no seguir ese ritmo y existe una elevada dependencia hacia el uso de los hidrocarburos los cuales emiten grandes cantidades de contaminantes que están perjudicando el equilibrio de la dinámica del medio ambiente generando fenómenos de alto impacto que colocan en riesgo el futuro de diferentes formas de vida, incluyendo la de los seres humanos.

En ese sentido, las propuestas para el aprovechamiento de las denominadas “energías limpias”, ha fomentado la propuesta de varias alternativas, en particular, el uso de paneles solares para la cosecha de energía. En este trabajo se muestran algunos de los principales beneficios de la implementación de parques agrivoltaicos, demostrando que son una buena alternativa para la obtención de energía y su posterior aplicación en la agricultura.

1.1 *La materia prima de los paneles solares: un elemento clave para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos*

El uso de paneles solares permite obtener una fuente de energía renovable que utiliza la luz del sol para generar electricidad. Sin embargo, su fabricación requiere de ciertos minerales que se extraen de diferentes países, lo que implica un impacto ambiental y social. Según un informe de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2022), los principales minerales que se utilizan para construir los paneles solares son el silicio, el cobre, el aluminio, el estaño, el plomo, el cadmio y el litio. Estos minerales se producen en distintas regiones del mundo, siendo China el mayor productor de silicio, cobre y aluminio, seguido por Perú, Chile y Australia. El estaño se produce principalmente en Indonesia, China y Perú, mientras que el plomo se obtiene de China, Australia y Estados Unidos. El Cadmio y el Litio son minerales más escasos y se producen sobre todo en China, Corea del Sur y Japón.

Tal como puede notarse, China es el primer productor de esos minerales estratégicos liderando el mercado hasta el punto de distinguirlo como “proveedor de tierras raras” hacia los Estados Unidos y Europa con una cuota de hasta el 70% del total mundial (Fernández, 2023). Asimismo, en un estudio realizado por la CEPAL (2020), se ha establecido cuáles son los países de la región de Latinoamérica que producen en mayor cantidad esos minerales estratégicos (Ver Tabla 1) y México posee una fuente importante de capacidad para tres minerales importantes (Cobre, Molibdeno y Níquel).

Tabla 1. Producción de Minerales estratégicos en América Latina y el Caribe 2020 (toneladas métricas)

	COBALTO	COBRE	LITIO	MOLIBDENO	NÍQUEL
BRASIL			1900		73.000
CHILE		5700	18.000	58.000	
COLOMBIA					38.000
ARGENTINA			6200		600
PERÚ		2200		18.100	30.000
CUBA	3600				49.000
MÉXICO		690		13.000	17.000

Fuente: CEPAL (2020)

Las proyecciones de la Tabla 1 implican que en América Latina se puede contar con una fuente continua de materia prima para la producción de los paneles solares y por ende constituye un referente importante para la formulación de proyectos en ese ámbito, pero para esto se requiere no solo disponer de esas reservas, también avanzar en materia tecnológica para la producción de paneles y demás estructuras que constituyen los grandes proyectos de inversión para energía fotovoltaica.

ISSN: 2992-8338

2. COEXISTENCIA ENTRE LA ENERGÍA SOLAR Y LA AGRICULTURA

En el caso de los parques solares, un estudio realizado por el Ministerio de Energía y Minas en Colombia (2021) explica que "la infraestructura puede requerir modificaciones del paisaje que transforman las funciones ecológicas de los suelos y, por tanto, impactan las dinámicas del agua, la vegetación y del carbono".

A pesar de lo anterior se está promoviendo un concepto de parque "agrivoltaico" en el cual se puede generar energía baja en carbono combinando las explotaciones agrícolas con los complejos de transformación de energía solar. Definiendo el uso de un terreno tanto para producir electricidad instalando paneles solares como para realizar actividades agrícolas y ganaderas.

Algunos referentes de interés se encuentran en PowerfulTree que fue presentado en España recientemente (septiembre-2023) fundamentándose como un "startup fotovoltaico".

Asimismo, en Europa se ha desarrollado el programa de start-ups de Iberdrola – PERSEO y en la edición del año 2022 se presentaron algunas propuestas de interés que se resumen a continuación:

* Regadío. La empresa EcoEnergías ubicada en España presentó una propuesta tipo estudio piloto para la combinación del cultivo de tomates bajo estructuras donde se soportarán paneles solares, disminuyendo el estrés en las plantas producto de las elevaciones de temperatura y granizo, así como una alternativa para el ahorro de suministro de agua. Se espera la mejora de las cosechas y a su vez generar "energía limpia".

* Viticultura. El proyecto surge con la colaboración de 3 empresas de España (Techedge, PVH, Bodegas González Byass) para proteger sus viñedos al generar sombra con tecnología de seguimiento inteligente. "Winesolar" trabaja con la base de un algoritmo de Inteligencia Artificial (IA) que puede controlar las necesidades fisiológicas del cultivo, además de proporcionar datos sobre medición de humedad, temperatura, entre otros.

* Frutales. Esta idea surge desde Francia y plantea también utilizar IA para moderar la luz y sombra en función de los datos del clima que se recolectan del terreno con el uso de sensores. Su objetivo principal es proteger las plantas de los cambios extremos (olas de calor, sequías, granizo/heladas).

* Bienestar Animal. Se sustenta en una plataforma para el análisis y monitoreo del comportamiento del ganado vacuno en FarmLife (Francia) y su objetivo es ahorrar tiempo e incrementar la productividad en función de 4 ejes claves: reproducción, nutrición, comodidad y salud animal.

Cuando se reflexiona sobre las propuestas anteriores parece algo difícil de verse en la realidad, pero si hay avances muy positivos. Por ejemplo, en España el gobierno de Catalunya está invirtiendo en la construcción de parques agrivoltaicos, mientras que en Latinoamérica se encuentra la publicación de BBVA (21 de Febrero de 2023) donde se describe como en Chile, específicamente en el desierto de Atacama se está construyendo el mayor parque solar de ese país que se ha denominado "Campos de Sol" cuyo objetivo es la utilización de paneles solares que permitan el desarrollo de cultivos de especies vegetales que puedan crecer a la sombra aprovechando el agua generada por el rocío durante la noche.

En cuanto a los países latinoamericanos, la información es limitada debido a que esta práctica de agricultura sustentable no se ha desarrollado a gran escala.

Triminio, A (2020), en su tesis "evaluación de la implementación de sistemas agrovoltaicos para la mejora de los cultivos en zonas andinas ecuatoriales", realiza una evaluación derivada de una investigación técnica y económica, con el propósito de encontrar la viabilidad del proyecto en un sistema agrivoltaico que se encuentra aislado de la red eléctrica que además, permite la siembra de cultivos, los cuales pueden irrigarse con un sistema de riego y monitoreo para el cultivo, con la energía obtenida de los paneles fotovoltaicos.

Peralta, J. (2022), en su tesis realiza una evaluación en cuanto a la implementación de un sistema agrivoltaico aislado de la red eléctrica, con un enfoque de optimización en la producción de cultivos. Entre sus hallazgos es importante señalar que se valora el diseño del parque e incluso se explica que no se requiere sacrificar áreas de cultivo para lograr su objetivo.

Las ventajas de los parques agrivoltaicos es el trabajo en conjunto de diferentes sistemas como la ganadería y agricultura, por lo que algunos de los beneficios que proporcionan estos parques agrivoltaicos, son el aprovechamiento de los terrenos áridos, mayor rendimiento en los terrenos de cultivo, y vida a los terrenos abandonados por otra parte el ahorro económico al minimizar o eliminar el pago por consumo de energía eléctrica a un proveedor externo, por lo que contribuyen a la disminución del consumo de hidrocarburos, además, en cuanto a la agricultura los parques permiten que la humedad de la tierra dure más tiempo, logrando que el cultivo que se encuentra bajo el panel solar permanezca protegida de la radiación solar, Solo por mencionar algunos.

Por ejemplo, la planta solar española de Las Corchas en Carmona, mantiene en sus instalaciones un apiario solar de colmenas inteligentes equipadas con sensores, cámaras y GPS. Generando un ejemplo de ecosistema sostenible con una transición energética compartida y en armonía con el territorio.

3. SITUACIÓN ACTUAL EN MÉXICO

La UNAM alberga la primera instalación agrivoltaica de México: la Parcela Agrivoltaica Sostenible y Educacional (PASE). En este proyecto, participa la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación del Gobierno de la Ciudad de México (SECTEI) financiadora de la PASE, instalada en el Centro de Enseñanza Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal (CEPIPSA), de la FMVZ, ubicado en Topilejo, alcaldía Tlalpan. En este proyecto, además, de captar la energía solar para la generar energía eléctrica, utilizan este recurso para

ISSN: 2992-8338

la deshidratación de cultivos, mismos que crecen bajo el parque fotovoltaico.

En México existe una gran cantidad de estudios relacionados con los parques fotovoltaicos, aunque poco orientados hacia la explotación agrícola, pero se encontraron 5 proyectos de parques privados que fueron suspendidos y expuestos en la publicación de BNamericas (29 de septiembre 2022) con algunos detalles que son importantes de tomar en cuenta:

El Proyecto fotovoltaico La Esperanza – Propietario: Tequila Solar. Está ubicado en el Estado de Campeche con un presupuesto proyectado de US$400 millones. Se encuentra paralizado por problemas relacionados con los permisos de uso de suelo, aunque se justifica más por razones de tipo político, este proyecto implica la construcción de una planta fotovoltaica con 1,11 millones de paneles de 340W repartidos en una superficie de 1.134ha en Ciudad del Carmen, estado de Campeche.

Otro importante proyecto es el Parque fotovoltaico Loma Roja – Propietario: Energías Renovables Venta III (Iberdrola Renovables México) con una inversión de US$336 millones y actualmente también se encuentra suspendido por problemas de impacto ambiental. También es el caso de la Central Fotovoltaica Guadalupe Sarabia propiedad de Framor Planta Solar 2 y con inversión aproximada de US$231 millones, mientras que el Parque solar Jalisco propiedad de Solar Jalisco y con inversión de US$171 millones, suspendido por situaciones de tipo político.

Tal como puede notarse, se necesita el impulso de la investigación sobre los beneficios y las posibilidades de aprovechamiento de la energía solar a fin de garantizar la viabilidad ambiental de los proyectos de parques fotovoltaicos, especialmente en México donde podría avanzar de tal manera que pudiese aprovecharse para el desarrollo agrícola.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo mostrado en este trabajo, se puede notar que en América Latina se cuenta con el potencial para la conformación de parques agrivoltaicos pero que requiere despertar el interés tanto académico como político-económico, porque se cuenta con referencias de desarrollo exitosos. Las inversiones millonarias que se han implementado tienen que justificarse en función de buscar alternativas que permitan potenciar las grandes sumas requeridas, sin embargo, varios proyectos se encuentran suspendidos por diversas razones, en especial las de tipo político-ambiental.

Varios grupos de investigación han probado las grandes ventajas que presentan este tipo de tecnologias aplicadas al campo, por ejemplo, el Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar ISE en cooperación con el Grupo de Innovación APV-Resola quienes han demostrado la viabilidad de la agricultura fotovoltaica o agrivoltaica con un sistema piloto APV de 194 kWp realizado en una granja cerca del lago de Constanza en Alemania. Los resultados del proyecto mostraron que APV aumenta la eficiencia del uso de la tierra en un 60%. Si bien estos estudios se llevaron a cabo en Europa. México cuenta con proyectos rentables de sistemas agrivoltaicos como el desarrollado en la UNAM y debido a las condiciones geográficas y a que en el país se tienen muchas comunidades rurales y grandes territorios de cultivo, es muy factible poder replicar el modelo europeo y tener proyectos sustentables que representen una novedosa opción para obtener y aprovechar los recursos naturales de forma más eficiente aprovechando la captación de energía y la agricultura en un mismo terreno.

AGRADECIMIENTOS

Marcían Adriana García Ávila agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de una beca de maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT: Cátedras CONAHCyT para jóvenes investigadores 2014 y SNI-CONAHCyT.

REFERENCIAS

Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2022). *Estadísticas de Capacidad Renovable 2021*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf?rev=a189d053a1844fafb918b6f3c735acc2

BBVA (Chile, 21 Febrero 2023). *Cosechar bajo paneles solares: los cultivos agrovoltaicos empiezan a ver la luz*, https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/cosechar-bajo-paneles-solares-los-cultivos-agrovoltaicos-empiezan-a-ver-la-luz/

Fernández R. (2023). *Cuota de mercado de China sobre el total de la producción mundial de minerales estratégicos seleccionados en 2022*, https://es.statista.com/estadisticas/1313087/produccion-de-tierras-raras-en-china/

Ministerio de Energía y Minas de Colombia (2022). *Diagnóstico Base para la Transición Energética Justa*, https://www.minenergia.gov.co/documents/10439/2._Diagn%C3%B3stico_base_para_la_TEJ.pdf

Peralta J. & Quito, M. (2022). *Evaluación de la implementación de sistemas agrovoltaicos para la mejora de los cultivos en zonas andinas ecuatoriales*, http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25419

Triminio A. (2020). Artificios Solares: Cultivando el Desierto de Atacama Entre el Cielo y el Suelo de Diego de Almagro (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Catolica de Chile (Chile)).

Enel Green Power. (2022). Los numerosos beneficios de la agrivoltaica para el mundo agrícola. https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/2022/12/beneficios-agrivoltaica-mundo-agricola

Enel Green Power. (2021). Sol y miel: la colmena fotovoltaica que ayuda a las abejas. https://www.enelgreenpower.com/es/historias/articles/2021/06/colmena-fotovoltaica

Boletín UNAM-DGCS-775 CEPIPSA. (2023). Instalan en la UNAM la primera parcela agrovoltaica de México. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2023_775.html

Energías Renovables el periodismo de las energías limpias, (14 septiembre 2021). BayWa r.e. y Fraunhofer ISE desarrollan soluciones agro-fotovoltaicas para el sector frutícola , https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/baywa-r-e-y-fraunhofer-ise-desarrollan-20210914

TREN MAYA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Thermographic and fractographic analysis of the heat treatments effect on Al 6061-T6 fatigue life

Víctor I. Rodríguez-Reyes * **Kevin Edson Petatan Bahena** *
Arturo Abúndez-Pliego * **Benjamín González Vizcarra** **

* *Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Av. Palmira Esq. Apatzingán S/N, Col. Palmira. C.P. 62490, Cuernavaca. Morelos, México (e-mail: victor.rodriguez18me@cenidet.edu.mx, d20ce008@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx).*
** *Universidad Autónoma de Baja California / FCITEC, Blvd. Universitario No. 1000, Unidad Valle de las Palmas. C.P. 21500. Tijuana, B.C. México (e-mail: bgonzalez79@uabc.edu.mx)*

Abstract: In this work, a qualitative assessment of the influence of heat treatments sequence on Al6061-T6 fatigue behavior was performed. The aluminum alloy was, on one hand, subjected to a set of designed heat treatments of aging, retrogression and reageing and then tested in a rotating beam fatigue machine; on the other hand, temperature evolution of specimens under fully reversed rotating beam cyclic loading was measured through an infrared thermographic camera. The evolution of temperature and its relationship with the fatigue life was discussed. Factographies were done as a complement in order to have visual evidence of the effect of the heat treatments on the nucleation and propagation of the fatigue crack. Evidence of the relationship between the fracture crack growth and the steady-state temperature of the tests was observed.

Keywords: heat treatments, aluminum, rotating bending, fatigue life, infrared thermography, fractography

1. INTRODUCTION

Fatigue failure is a phenomenon which consists in the presence of cracks and deformations generated by cyclic loading, which eventually lead to a failure by fracture, even when loading does not surpass the elastic limit. The costs associated with fractured materials can reach up to 4% of the gross domestic product (Reed et al., 1983). It has been related to many failures and disasters in many industries as aviation, oil and gas, railway transport, among others (Schütz, 1996). Only in the railway industry, one of the most remarkable disasters was the Versailles rail accident in 1842, due to a broken axle which failed by fatigue. Then, metal fatigue was poorly understood, and this led to August Wöhler to research this phenomenon and to propose the now known S-N curves. In 1998, the Eschede train disaster was caused by a fatigue crack in one wheel with poor design. In 2021, Mexico City Metro overpass collapse was caused, among other things, by the lack of functional studs and poor-quality welds that led to fatigue. As can be seen by the cases mentioned above, fatigue failure still has much incidence and, since currently there are many projects in railway industry such as Mayan Train, Interurban Train Mexico City–Toluca and the Interoceanic Corridor of the Isthmus of Tehuantepec, it is important to keep researching this type of failure, in order to saving costs and avoiding disasters with human fatalities.

Heat treatments consist in the modification of the mechanical properties and metallographic structure of the material by controlled increases and decreases of temperature. They are applied for improving the performance of materials, through forming precipitates within the material, being an impediment for the motion of dislocations, increasing the elastic limit and the ultimate strength. Therefore, heat treatments are a reliable tool for improving fatigue life of aluminum alloys. Heat treatments of retrogression and reageing increase the rigidity of the material and decrease the fatigue crack growth rate, improving the properties of damage tolerance (Abúndez et al., 2016; Mayén et al., 2019). Heat treatments also increase the elastic and endurance limit (Mayen et al., 2019; Nelaturu et al., 2020). On the contrary, even when heat treatments improve the mechanical properties of the material and its behavior in low-cycle fatigue, they can decrease the resistance to plastic strain, reducing the ductility of the material and making it to behave brittle (Azadi and Shirazabad, 2013).

The relation between fatigue life and energy dissipation has been of interest for many researchers, as recent literature shows (Teng, 2023). Naderi et al. (2010) calculated the entropy generation of metallic materials under cyclic loading by integrating the energy dissipation over the material temperature along the fatigue tests. They proposed the hypothesis that entropy generation at the point of fracture is constant and independent of the stress level, loading frequency and geometry of the specimen,

ISSN: 2992-8338

being a material parameter. They named this concept as fracture fatigue entropy (FFE). Based on this hypothesis, a series of methodologies for prevention of failures in metallic materials under cyclic loadings have been developed (Naderi and Khonsari, 2011; Teng, 2023). They are based on the measurement of temperature evolution during the fatigue tests, which can be done with infrared thermography, having the advantage of being a noncontact and nondestructive technique. It has been shown that, when a material is subjected to constant amplitude cyclic loading, it presents dissipation of energy, which manifest itself as heat. This heat is manifested as a temperature evolution, characterized by three stages, which are related to the stress-strain response: an initial rapid temperature increase, a steady-state temperature during a large part of the fatigue process, and a final abrupt temperature increase, followed by a drop after the failure. Therefore, the change of temperature during fatigue can be used as an index of accumulation of damage for fatigue life prediction.

In this work, Al 6061-T6 is subjected to heat treatments of own design in order to find the best combination of temperature and time treatment which improves the fatigue life, tested under constant amplitude loading. The temperature behavior of the material was monitored, and fractographies were done, in order to determine the influence of the heat treatment and to determine how the crack propagation rate changes according to each one, by the effect of the precipitation of the solid phases.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The number and geometry of specimens were proposed according to the ASTM E739 (ASTM International, 2004) and ASTM E466 (ASTM International, 2002) standards, respectively. The specimen geometry is shown in Fig. 1, where the diameter d of the gage length is 6.35 mm (1/4 in).

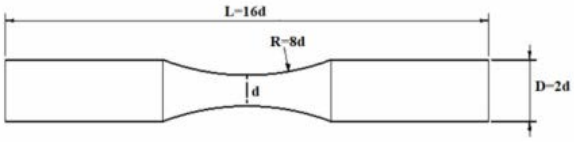


Fig. 1. Geometry of the specimens in function of the diameter d of the gage section, according to ASTME466.

The material selected is Al 6061-T6, its chemical composition and mechanical properties are shown in Table 1 and Table 2, respectively.

Six different levels of time and temperature for the heat treatments were proposed, with six samples for each treatment. The total number of specimens for the fatigue tests were 72. The defined sequence for the treatments consists in (1) a solution at 554 °C for one hour, (2) immediate cooling of the specimens in water at room temperature, (3) artificial reageing in the designed conditions of temperature and time for the designed heat treatments and finally (4) a retrogression at 250 °C for 10 minutes. The parametric design for the heat treatments is shown in Table 3.

2.1 Experimental setup

The used fatigue testing apparatus is a rotating beam fatigue test machine with a constant-speed motor of 1740 rpm (29 Hz). Tests include clamping the specimen at both ends in grips, and dead weight makes the load to fluctuate between tension and compression at a specified stress amplitude of 150 MPa, being completely reversed load. All tests were conducted by setting up a pristine sample in the machine and continuously running until fracture. Infrared thermography was used to acquire the temperature of the specimens during the fatigue tests. Hti HT-18 camera was used for capturing thermal images from the specimen every five seconds. Before the experiment, the specimen surface was painted with a black mate color to increase the thermal emissivity and thus enhance the temperature measurement accuracy. Fig. 2 shows thermal images of a specimen before and halfway through a test. The temperature evolution of the specimen is quite clear.

About a possible error scattering in the temperature measurement, it is feasible that some unconsidered and uncontrolled variables may affect the measuring. Such variables may be the ambient temperature, lightning (heat transfer by radiation), air currents (heat transfer by convection), incorrect assembly (mechanical unbalances), among others. Then, a proper energy balance should be solved to know the amount of each heat component, although some researches have shown that heat transfer may be considered negligible if it is not part of the parametric study (Naderi et al., 2010). Besides, in order to make the mentioned characterization, some physical properties are necessary, which were not estimated in this study.

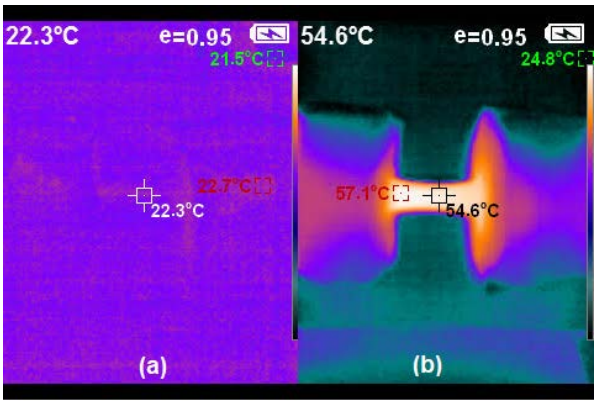


Fig. 2. Thermal image of the specimen (a) before and (b) halfway through a fatigue test.

Visual inspection of the fracture surfaces was conducted using a Mitutoyo Stereo Microscope, with 20x magnification. Photographies were taken with a True Chrome II camera.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Results such as fatigue life, a statistical analysis of the dispersion of the data, a regression model between fatigue life and the parametric conditions of the designed heat treatments, and the energy required for each of them can be consulted in reference: (Petatan Bahena, 2022).

ISSN: 2992-8338

Table 1. Component elements (% by weight).

Alloy	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Other
6061-T6	95.8-98.6	0.04-0.35	0.15-0.40	<=0.70	0.80-1.2	<=0.15	0.40-0.80	<=0.15	<=0.25	<=0.15

Table 2. Mechanical properties.

Ultimate Tensile Strength	Yield Tensile Strength	Elongation at break (%)	Modulus of elasticity (GPa)	Poisson's ratio	Fatigue Strength (MPa)	Shear modulus (GPa)	Shear Strength (MPa)
310	276	17	68.9	0.33	96.5	26	207

Table 3. Heat treatments in function of temperature and time.

Condition	Temperature (ºC)	Time (minutes)
T1	150	120
T2	165	
T3	180	
T4	195	
T5	210	
T6	225	
C1	192	30
C2		60
C3		90
C4		120
C5		150
C6		180

Here only the results from infrared thermography and fractography are being presented and discussed.

3.1 Thermographic analysis

The temperature behavior of the specimens under fatigue tests until fracture are depicted in Fig. 3, where it is possible to observe that all exhibited a similar behavior of three well-identified phases. In the first phase, the temperature increases rapidly. The second phase begins when the temperature stabilizes and becomes constant. The third and last phase occurs rapidly before failure, when the temperature suddenly rises. The third phase occurs very fast, so the infrared camera is unable to record most of the temperature evolution in this part of the tests. In the figure, OO represents the material without thermal treatment.

The different initial temperature slopes of the samples are associated with its capacity to dissipate energy, as some researches have shown (Teng, 2023). It is usual to use the temperature slope to characterize the dissipation of energy of a fatigue process, although the density of the material and its heat capacity are required. While the density among the material without the heat treatments and the treated samples should be the same, the heat capacity must have changed, as the change in the temperature rate shows.

The heating is mainly caused by the plastic deformation of the material, if there are not external heat sources. In this case, the specimens were tested at room temperature without controlling temperature or air fluxes, although they were not study variables, so their influence were considered as negligible. On the other hand, temperature is a frequency dependent parameter, then testing the material to higher frequencies would elevate the temperature rate, and vice versa for low frequencies. Since this study was conducted to a constant frequency, the influence of this parameter in the temperature evolution can be considered negligible too.

The temperature plateau reached by many of the tested specimens is explained by the process of work hardening of the material, caused by the dislocations movement and generation at the beginning of the fatigue process. Then, a resistance to deformation is developed, which causes a constant hysteretic behavior in the associated stress-strain curve, and this behavior is exhibited in the reached steady state temperature.

It can be seen that some specimens do not present a steady-state temperature (phase II). Specifically, heat treatments OO, T1, T6, C1 . This can be related to the short fatigue life, compared with heat treatment T4, for example, being the one that achieved the largest extension of fatigue life. This only can mean that the heat treatment T4 must have changed some microstructural properties which decrease the microstructural plastic deformation and therefore the energy dissipation exhibited as heat, since some characteristics like the elastic deformation or internal friction produce only the variation of the temperature around a mean, and not the temperature increase.

3.2 Fractographic analysis

In the following images of the fractured surfaces obtained by microscope, the fracture mechanisms can be observed. It can be seen diverse points where the crack started, which progressed until fracture. They propagate in a stable regime through the interior of the material until fracture. With the scale of these fractographies, it is not possible to perceive benchmarks totally, although the duration of the crack propagation can be qualitatively inferred.

In Fig. 4 a fractography image of one specimen without heat treatment is shown. It can be seen that the crack nucleation occurred in multiple zones of the specimen, as shown by the yellow lines, from where the crack propagation extended through the red circle, as the Chevron marks shown as purple lines. The figure shows that a brittle fracture (plane zone delimited by the red circle) is extended up to 90% of the total fracture surface. The final fracture occurred at the zone represented by the green line, where protuberances at 45º can be appreciated, which are typical characteristics of a ductile fracture.

In Fig. 5 similar patterns can be seen for a specimen with treatment T4, the one which achieved the longest life. A 100% ductile fracture zone is evidenced by the

ISSN: 2992-8338

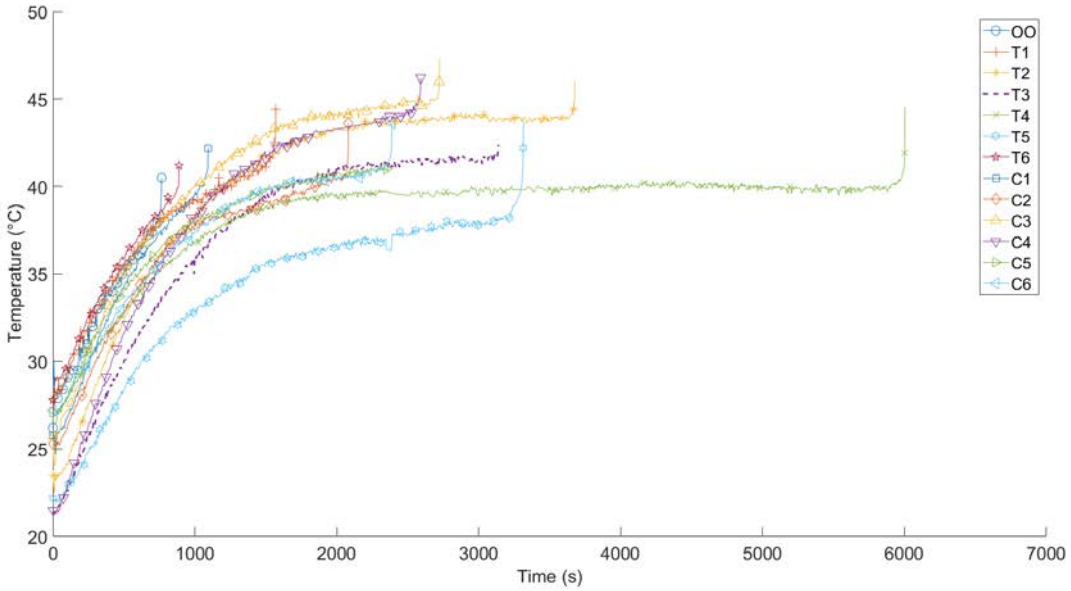


Fig. 3. Temperature variation in the rotating beam fatigue test of Al6061-T6 specimens at 150 MPa. OO denotes specimen without treatment.

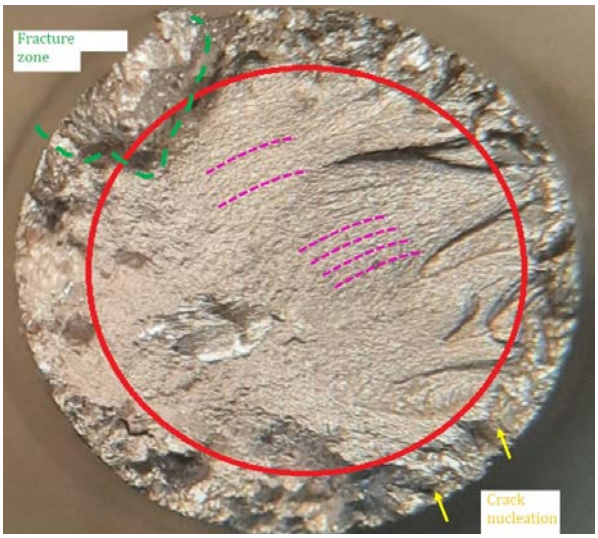


Fig. 4. Plane fracture surface of a failured specimen without thermal treatment.

protuberances at 45º (see the green line). Multiple crack nucleations can be appreciated too and the crack propagation is evidenced by the Chevron marks pointed by the purple lines. The crack propagation zone is smaller than the one of a specimen without treatment. This is a clear sign that the crack propagation had an extended duration since the heat treatment must had improved the strength of the material to fatigue stresses.

The changes between Fig. 5 and Fig. 4 may indicate a decrease on the acting stress, or an increment of the strength of the material. The crack propagation area in Fig. 4 is centered on the plane fractured surface of the specimen, which indicates that the specimen was subjected to higher nominal stresses than the specimen of Fig. 5. In this last one, the crack propagation area is lightly displaced from the center of the specimen, in opposite direction of the rotation, which is a characteristic of fractures occurring under rotating bending load, being more evident under low nominal stresses.

Among other factors which can influence in the change of the fracture behavior seen in the fractographies are local microstructure differences, variation of the medium

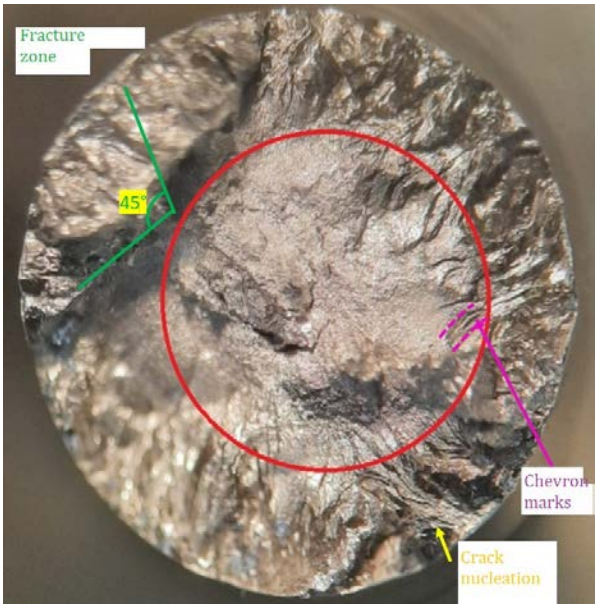


Fig. 5. Ductile fracture surface of a failured T4 specimen.

ISSN: 2992-8338

in which the crack propagates, local variations in the state of stress, etc., which may be influenced by the heat treatments.

Finally, in Fig. 6 the fractography of a C1 specimen can be seen. A mixed fracture surface, delimited by the red circle, can be seen, with an extension up to 70% of the area, and the final ductile fracture zone is associated with the protuberances at 45º (see green line), with an extension up to 30% of the area. The specimen showed multiple crack nucleation points (yellow arrows), from where the crack propagated, as can be seen by the Chevron marks (purple lines). Heat treatment C1 barely improved the fatigue life of the AA6061-T6. Besides, the thermal behavior of the specimens showed a continuous change in temperature rate, not allowing to reach a steady-state temperature.

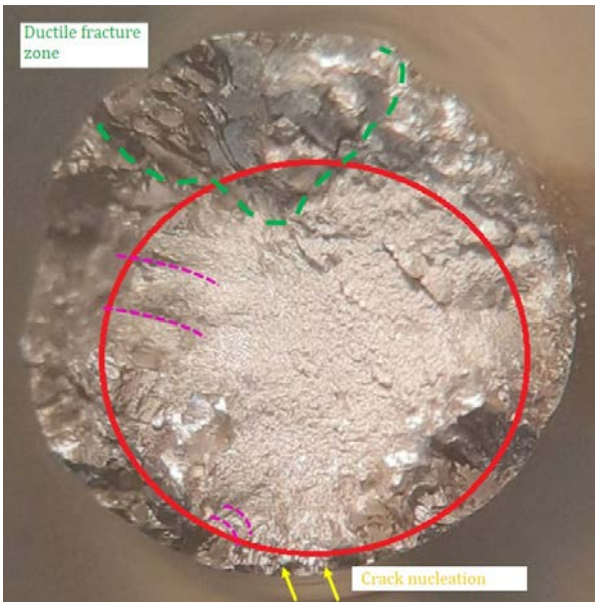


Fig. 6. Mixed Fracture Surface of a failured C1 specimen.

It was found that temperature, rather than the time, has the highest influence aimed at improving the fatigue life, since its increment generates precipitates which increases ductility, as can be evidenced by the protuberances observed in fractographies. When a material reaches the equilibrium state, its entropy (and associated disorder) level is maximum. To increase orderliness, the material needs to deviate from equilibrium state. In a fatigue process, this can occur by self-organization, which is associated with the formation of dissipative structures. In a fatigue process, these dissipative structures correspond to the arrangement of new patterns of the material's microstructure, for example, a critical density of dislocations, particle size distribution, orientation of crystals, persistent slip bands, and thanks to them, the entropy generation in the system decreases, resulting in a slowing down of the fatigue damage and the increasing of fatigue life. As a result of self-organization, the material reaches a lower entropy generation after the heat treatment, compared to the thermodynamic state before the occurrence of dissipative structures.

The concept of dissipative structures was presented by Nobel prize winner Prigogine (1978) and its use for the creation of more resistant materials has been discussed in references: (Khonsari and Amiri, 2012; Naderi, 2020).

4. CONCLUSION

An in-depth understanding of the conditions leading to the formation of dissipative structures and to self-organization in materials after heat treatments might lead researchers and engineers to improve and to design novel materials with longer useful life or better properties. Therefore, continuous research which tries to relate the effects of heat treatment processes with the modification of this dissipative structure in a quantitative form is required.

For now, the thermography and fractography at the scale done in this case study allows to relate the fatigue crack propagation and the steady-state temperature of the process in a qualitative form, being both evidence of the modification of the microstructure of the material, resulting in decreasing the rate of entropy generation and, therefore, slowing down the damage in the material and consequently increasing its useful life. That's why the quantification of this dissipative structures is necessary, in order to relate them to the parameters of the heat treatments. Then, the better combination of time and temperature for the heat treatments can be proposed in order to maximize the fatigue life, based on the physics of the process and not only with regression models from curve fitting.

A qualitative relation between temperature and the mode of failure was established. Treatment T4 exhibited a ductile failure and the measured temperature evolution depicted a steady-state temperature for a longer time. In contrast, treatment C1 showed a continuous increasing temperature and a mixed mode of failure. Although the size of the crack propagation areas would be important to be estimated, this work was bounded to a qualitative assessment. Therefore, an evaluation of the size of the crack propagation areas depending of the heat treatment conditions would be a very useful complement in further research.

ACKNOWLEDGEMENTS

To CONACYT for the scholarships 1031303 and 773824 for Master and doctoral studies, respectively, and to TecNM by the support through the project 16909.23-P.

REFERENCES

Abúndez, A., Pereyra, I., Campillo, B., Serna, S., Alcudia, E., Molina, A., Blanco, A., and Mayén, J. (2016). Improvement of ultimate tensile strength by artificial ageing and retrogression treatment of aluminium alloy 6061. *Materials Science and Engineering: A*, 668, 201–207. doi:10.1016/j.msea.2016.05.062.

ASTM International (2002). ASTM E466-96, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. doi: 10.1520/E0466-21.

ASTM International (2004). ASTM E739-91. Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S–N) and strain-life (e–N) fatigue data. doi: 10.1520/E0739-10R15.

ISSN: 2992-8338

Azadi, M. and Shirazabad, M.M. (2013). Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviors of A356.0 aluminum alloy. *Materials Design*, 45, 279–285. doi:10.1016/j.matdes.2012.08.066.

Khonsari, M.M. and Amiri, M. (2012). *Introduction to Thermodynamics of Mechanical Fatigue*. CRC Press Taylor Francis Group, Boca Raton, FL. doi: 10.1201/b12725.

Mayén, J., Gallegos-Melgar, A., Mercado-Lemus, V., Hernandez-Hernandez, M., Abúndez, A., Alcudia, E., Pereyra, I., Serna, S., and Poblano-Salas, C. (2019). Control Parameters Correlation by Multiple Linear Robust Regression for the Design of Heat Treatments For Al-6063 Alloy. *Experimental Techniques*, 43(1), 91–103. doi:10.1007/s40799-018-0269-7.

Mayen, J., Gallegos-Melgar, A., Abúndez, A., Alcudia, E., Colín, J., and Barredo, E. (2019). Yield Strength Improvement of an Al-6063 Alloy by Applying a Novel Combination of Cold Working and Heat Treatments for Die Casting of Plastic Parts. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72(5), 1211–1220. doi: 10.1007/s12666-019-01609-z.

Naderi, M., Amiri, M., and Khonsari, M.M. (2010). On the thermodynamic entropy of fatigue fracture. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2114), 423–438. doi: 10.1098/rspa.2009.0348.

Naderi, M. and Khonsari, M. (2011). Real-time fatigue life monitoring based on thermodynamic entropy. *Structural Health Monitoring*, 10(2), 189–197. doi: 10.1177/1475921710373295.

Naderi, M. (2020). On the Evidence of Thermodynamic Self-Organization during Fatigue: A Review. *Entropy*, 22(3), 372. doi:10.3390/e22030372.

Nelaturu, P., Jana, S., Mishra, R.S., Grant, G., and Carlson, B.E. (2020). Effect of temperature on the fatigue cracking mechanisms in A356 Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 780, 139175. doi: 10.1016/j.msea.2020.139175.

Petatan Bahena, K.E. (2022). *Evaluación del efecto de los tratamientos térmicos sobre la vida a fatiga de aleaciones de aluminio.* Master's thesis, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, México.

Prigogine, I. (1978). Time, Structure, and Fluctuations. *Science*, 201(4358), 777–785. doi: 10.1126/science.201.4358.777.

Reed, R., Smith, J., and Christ, B. (1983). *The economic effects of fracture in the United States*, volume 647. US Department of Commerce, National Bureau of Standards. URL `https://www.govinfo.gov/app/details/GOVPUB-C13-831b1a5d974bb0b32ccfc5f0e249362c`.

Schütz, W. (1996). A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 54(2), 263–300. doi:10.1016/0013-7944(95)00178-6.

Teng, Z. (2023). Thermo-based fatigue life prediction: A review. *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures*, 46(9), 3121–3144. doi:10.1111/ffe.14079.

ISSN: 2992-8338

Magnetorheological Fluid Inerter Design and Construction

Cuauhtémoc Mazón Valadez*. Jorge Colín Ocampo*. Andrés Blanco Ortega*. Eduardo Barredo Hernández. Demetrio Pérez Vigueras*. Javier Antonio Pérez Molina***

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Int. Palmira, Cuernavaca, Morelos, C. P. 62490, México (Tel: 348-107-9322; Correos: d17ce022@cenidet.tecnm.mx, jorge.co@cenidet.tecnm.mx, andres.bo@cenidet.tecnm.mx, demetrioperez16m@cenidet.edu.mx , m22ce032@cenidet.tecnm.mx).*

***Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), Huajuapan de León, Oaxaca, C. P. 69000, México (correo: eduardin@mixteco.utm.mx).*

Abstract: This paper outlines the process for designing and constructing a magnetorheological fluid inerter, which can be used for passive vibration control. The approach accounts for the principle of operation of a standard fluid inerter to determine inertance and damping forces in the helical channel. A preliminary test corroborated models from the literature and showed the effectiveness of the magnetorheological fluid inerter as a working fluid.

Keywords: inerter; passive vibration control; magnetorheological fluid; damping systems; fluid inerter; damping forces; magnetorheological fluid inerter.

1. INTRODUCCIÓN

La mitigación de vibraciones no deseadas en las estructuras es una parte importante del proceso de diseño, especialmente para estructuras sujetas a fuerzas de excitación externa. Cuando esta fuerza coincide con la frecuencia natural de la estructura se produce el efecto de resonancia incrementando la amplitud vibratoria de la estructura. Con la finalidad de controlar esta amplitud de vibración, investigaciones en las áreas de ingeniería civil, mecánica y rotodinámica han propuesto novedosos sistemas de amortiguamiento. Estos dispositivos de control de vibraciones se pueden categorizar en cuatro clasificaciones: sistemas pasivos, activos, semiactivos e híbridos (Pastia *et al.*, 2005). Entre ellos los sistemas de control pasivo de vibraciones destacan en sencillez, debido a que no están gobernados por leyes de control ni sensores que dificulten su funcionamiento (Constantinou *et al.*, 1998). Un ejemplo son los amortiguadores de masa sintonizada o por sus siglas en inglés (TMD), que han recibido considerable atención y reconocimiento en las dos últimas décadas.

Los TMD se han modificado con la finalidad de mejorar su robustez y desempeño dinámico en investigaciones tales como: los TMD no tradicionales con conexión a tierra (Ren, 2001; Cheung y Wong, 2011), basados en el modelo de Maxwell (Batou y Adhikari, 2019; Nishihara, 2019), múltiples TMD configurados en conexiones tanto en serie como en paralelo (Kim y Lee, 2018; Asami, 2019), así como otros diseños. Sin embargo, es importante señalar que el rendimiento del TMD depende en gran medida de su diseño, sobre todo en la masa del mismo limitando su rendimiento para el control de vibraciones (Schmelzer *et al.*, 2010).

Posteriormente, con la adición de un nuevo dispositivo mecánico denominado inersor. (Smith, 2002) Demostró que el incremento de la masa física del TMD puede ser proporcionada por la inertancia de este novedoso dispositivo, que ha sido implementado en la disipación de energía vibratoria a través de diferentes configuraciones de redes mecánicas (Marian y Giaralis, 2014; Smith, 2020).

En la literatura se reportan diferentes alternativas de diseños del inersor, en los que destacan los de tipo: cremallera-piñón (Papageorgiou et al. 2009); tornillo-bola (Smith, 2020); de inertancia variable (Brzeski et al. 2017); con fluido basado en mecanismos de rectificación del movimiento del flujo del fluido (Swift *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2016); y el híbrido llamado electrohidráulico (Shen *et al.*, 2019). Nótese, que los primeros tres tipos de inersor se basan en componentes mecánicos como volantes de inercia para poder producir la inertancia. Por otra parte, los inersores basados en configuraciones hidráulicas obtienen la inertancia mediante el flujo del fluido que se desplaza en un canal helicoidal (Swift *et al.*, 2013). Aunque estos últimos no han sido ampliamente investigados en la literatura, los inersores con fluido ofrecen algunas ventajas sobre los dispositivos mecánicos. Como, por

ISSN: 2992-8338

ejemplo, su sencilles de diseño y su construcción. Asimismo, también es posible proporcionar una inertancia variable en el sistema mediante el uso de válvulas que regulen el flujo del fluido o con el uso de fluidos inteligentes como es el caso de los fluidos magnetorreológicos (Sims *et al.*, 2018). Por lo tanto, los inersores basados en fluidos pueden implementarse de forma sencilla pero eficiente en cualquier tipo de red mecánica en el control de vibraciones. En el presente estudio se tiene como objetivo la construcción de un inersor con fluido analizando el efecto de la inertancia y las fuerzas de amortiguamiento del inersor, realizando una corroboración con la literatura y una prueba preliminar utilizando fluido magnetorreológico como fluido de trabajo.

Este documento está organizado de acuerdo con la siguiente estructura: En la sección 2, se describen los fundamentos teóricos de análisis de la inertancia y la fuerza de amortiguamiento producidas por el inersor con fluido. En la sección 3, se muestran la metodología que se utilizó para el diseño y construcción del inersor. En la sección 4: se muestra el análisis experimental preliminar del prototipo físico y finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

2. PRINCIPIO DE TRABAJO DEL INERSOR CON FLUIDO

Considerando el diagrama esquemático de la Fig. 1, se puede observar que el cuerpo del cilindro y la flecha del pistón son las dos terminales de trabajo del dispositivo. Al aplicar una fuerza al pistón, se genera un movimiento relativo que impulsa el fluido a través del canal helicoidal, aumentando la velocidad de flujo en el canal a partir de la velocidad del pistón que es función de la relación de las áreas de trabajo del pistón y del canal. Por tanto, la inertancia del dispositivo se puede aumentar reduciendo el área del canal o aumentando el área del pistón. En esta sección, se considera el modelado descrito por (Shen *et al.*, 2016) para calcular los parámetros del inersor con fluido.

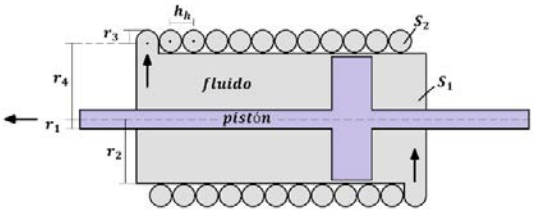


Figura 1. Diagrama esquemático del inersor con fluido.

Por tanto, la inertancia del dispositivo se puede aumentar reduciendo el área del canal o aumentando el área del pistón. En esta sección, se considera el modelado descrito por (Shen *et al.*, 2016) para calcular los parámetros del inersor con fluido.

2.1 Inersor con fluido ideal

De acuerdo con la ley de conservación de la energía, la inertancia puede expresarse como:

$$^1/_2\, b\dot{x}^2 = {}^1/_2 J_I \dot{\theta}^2 \tag{1}$$

Donde x representa el desplazamiento del pistón, J_I el momento de inercia a causa del flujo del fluido, θ es el desplazamiento angular del fluido a través del canal helicoidal y b representa la inertancia del dispositivo. La inertancia proporcionada por el inersor de acuerdo con (Smith *et al.* 2012) se expresa:

$$b = \frac{m_f}{1+\left(\frac{h_h}{2\pi r_4}\right)^2}\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \approx \frac{\rho l_h S_1^2}{S_2} \tag{2}$$

Donde las variables relacionadas con el canal helicoidal son: m_f la masa del fluido; h_h la separación entre el número de vueltas n; r_4 el radio de la circunferencia; S_2 el área de la sección trasversal; la longitud media l_h; y las demás variables representan el área de la sección de trabajo de la cara del pistón S_1 y la densidad del fluido ρ. Para el cálculo de la inertancia del inersor se tomaron en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$S_1 = \pi(r_2^2 - r_1^2) \tag{3}$$

$$S_2 = \pi r_3^2 \tag{4}$$

$$m_f = \rho S_2 \tag{5}$$

$$l_h = n\sqrt{h_h^2 + (2\pi r_4)^2} + 2l_0 \tag{6}$$

Donde r_1 representa el radio del eje del pistón, r_2 el radio interno del cilindró con respecto del eje central, r_3 el radio de la sección trasversal del canal helicoidal y l_0 representa la longitud de la entrada o salida del cilindro al canal helicoidal. Se debe mencionar que el cálculo de inertancia de la ecuación (2), representa los momentos de inercia exclusivos del canal helicoidal debido a que las aportaciones de los momentos inerciales en el cilindro son insignificantes en comparación a la inercia producida en el canal helicoidal, puesto que esta es función de la relación entre el área del pistón y el área del canal S_1/S_2. Adicionalmente a la inertancia, el inersor con fluido ofrece el efecto de amortiguamiento provocado por la fricción entre el pistón y el cilindro causado por la resistencia del fluido al recircular por el canal helicoidal. En este trabajo solo se aborda el análisis de la fuerza de amortiguamiento producido por la resistencia al flujo del fluido. Además, solo se consideran las propiedades de un fluido convencional

ISSN: 2992-8338

excluyendo las propiedades de los fluidos magnetorreológicos debido a que solo se considerara este fluido inteligente en el estudio preliminar.

2.2 Amortiguamiento por la resistencia al flujo del fluido

El cálculo de amortiguamiento del inersor parte del análisis de presión en la entrada, salida y dentro del canal helicoidal. Considerando que la velocidad de flujo es laminar estacionario en el canal helicoidal, la velocidad es distinta en los puntos de la sección trasversal del canal debido a la viscosidad del fluido como se muestra en la Fig. 2. Tal y como lo dice la ley de Hagen-Puseuille, la velocidad máxima del fluido se encuentra en el centro de la tubería y empieza a decrecer conforme se acerca a las paredes de la tubería. Asimismo, existen dos presiones dentro del canal una en dirección del flujo ρ_1 y la otra en contra ρ_2, estas presiones ejercen un apoyo al flujo y una resistencia respectivamente. Donde $\rho_1 > \rho_2$ para que exista el flujo dentro de la tubería.

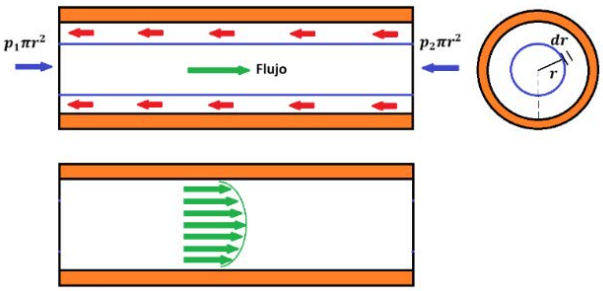


Figura 2. Comportamiento del fluido en el canal helicoidal.

Por lo tanto, la resistencia del flujo en el canal se puede expresar como:

$$F_c = (\Delta p + \Delta p_1 + \Delta p_2)S_1 \tag{7}$$

Donde las diferencias de presión en la entrada Δp_1, salida Δp_2 y el canal Δp se calculan mediante la ley de conservación de la masa para un volumen de control:

$$\Delta p_1 = 0.5\frac{\rho u^2}{2} \tag{8}$$

$$\Delta p_2 = \frac{\rho u^2}{2} \tag{9}$$

$$\Delta p = \frac{8\mu_f l_h S_1}{r_3^2 S_2}\dot{x} \tag{10}$$

Donde μ_f es la viscosidad del fluido y u representa la velocidad media del desplazamiento del fluido en el canal.

$$u = \frac{r_3^2 \Delta p}{8\mu_f l_h} \tag{11}$$

Sustituyendo las ecuaciones (8) - (11) en la ecuación (7), se obtienen la fuerza de amortiguamiento producida por el fluido en el canal helicoidal:

$$F_c = \frac{8\mu_f l_h S_1^2}{r_3^2 S_2}\dot{x} + \frac{3\rho S_1^3}{4S_2^2}\dot{x}^2 \tag{12}$$

2.3 Comprobación de las fuerzas de amortiguamiento

Utilizando los parámetros de la Tabla 1, en la Fig. 3 se muestra el comportamiento de la ecuación (12) en función de la velocidad del fluido. Asimismo, los resultados obtenidos de la ecuación (12) se compararon con los resultados obtenidos utilizando los modelos descritos en la literatura (Swift *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018). Los resultados demuestran similitudes con los modelos del Shen y Liu respectivamente. De los resultados obtenidos se concluye que la ecuación (12) simula de manera adecuada el efecto de amortiguamiento generado por la resistencia del flujo.

Tabla 1. Parámetros descritos en la literatura (Shen *et al.*, 2016).

Parámetros		Cantidad	Unidades.
Área de trabajo del pistón.	S_1	2.83E-5	m^2
Área del canal helicoidal.	S_2	1.10E-3	m^2
Diámetro del canal helicoidal.	D_1	0.006	m
Longitud del canal helicoidal.	l_h	5.22	m
Densidad del fluido.	ρ	999	kgm^{-3}
Viscosidad del fluido.	μ_f	0.001	$Pa \cdot s$
Radio de la circunferencia del canal	r_4	0.0415	m

Por tanto, tomando como base las ecuaciones (2) y (12), se realizó la parametrización para la obtención de las dimensiones del inersor con fluido.

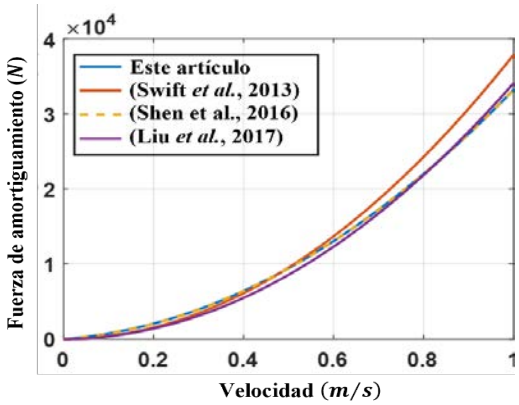


Figura 3. Comparación de la fuerza de amortiguamiento de acuerdo con modelos de la literatura.

ISSN: 2992-8338

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Además del análisis del principio de trabajo del inersor con fluido (Sección 2), para la obtención de los parámetros de diseño mecánico, se tomó en cuenta las metodologías descritas en la literatura sobre "el análisis de control de vibraciones en elementos tipo viga (Jin *et al.* 2016)", " los amortiguadores de masa sintonizada con inersor o por sus siglas en inglés (TMDI) (Hu *et al.*, 2015)" y "la metodología extendida de los puntos fijos (Barredo *et al.*, 2018)". En la Fig. 4, se muestra el diagrama de flujo propuesto para el diseño del inersor.

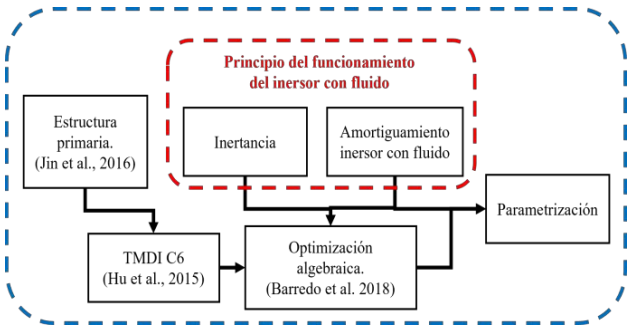


Figura 4. Diagrama de flujo propuesto para la obtención de las dimensiones del inersor con fluido.

3.1 Parametrización del inersor con fluido

Tabla 2. Parámetros obtenidos para el inersor con fluido.

Parámetros		Valor	Unidades
Área de trabajo del pistón.	S_1	2.26E-5	m^2
Área del canal helicoidal.	S_2	3.12E-5	m^2
Diámetro del canal helicoidal.	D_1	0.006	m
Número de vueltas de canal helicoidal.	n	2	vueltas
Separación de las espiras del canal helicoidal.	h_h	0.0526	m
Longitud del canal helicoidal.	l_h	5.34	m
Radio de la circunferencia del canal helicoidal.	r_4	0.0365	m
Longitud de la entrada o salida	l_0	0.03172	m
Longitud de trabajo del cilindro	l_t	0.1314	m

Siguiendo la metodología propuesta en la Fig. 4, se obtienen los parámetros de diseño del inersor con fluido. Los parámetros de diseño obtenidos se presentan en la Tabla 2.

3.2 Diseño CAD

Obtenidos los parámetros de diseño del inersor mostrados en la Tabla 2, se realizó el modelo preliminar del inersor con fluido mediante el diseño asistido por computadora (CAD). En la Tabla 3 y la Fig. 5, se muestran los componentes y la vista explosionada del diseño del inersor.

Tabla 3. Componentes principales del inersor con fluido

#	Componentes	Cantidad
1	Cilindro del inersor con fluido.	1
2	Tubería del canal helicoidal.	1
3	Pistón.	1
4	Buje.	2
5	Prisionero de llenado y purga	2

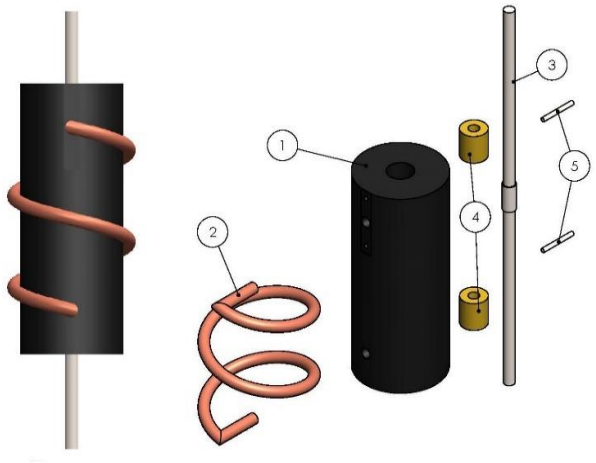


Figura 5. Diseño preliminar de inersor con fluido con sus componentes principales.

3.2 Prototipo físico

Posteriormente basado en el diseño CAD, se realizó la manufactura del prototipo tomando en consideración materiales diamagnéticos (materiales que no afectan el comportamiento de las líneas del campo magnético). Esto con la finalidad de poder realizar estudios experimentales con fluidos magnetorreológicos. Los materiales seleccionados para la manufactura del prototipo físico del inersor son: acero inoxidables serie 300 para el pistón, aluminio para la camisa interna del cilindro, cobre para el canal helicoidal, latón para los bujes de acción del pistón y nylamid para el cuerpo del inersor. En la figura 6, se muestra el prototipo de inersor construido.

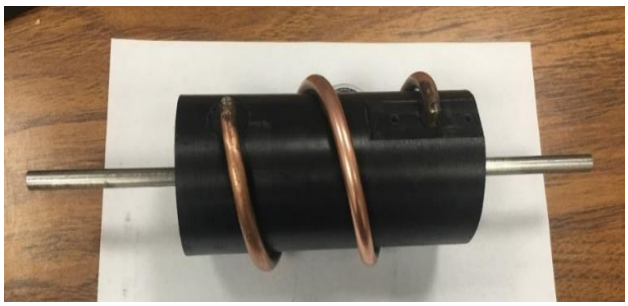


Figura 6. Inersor con fluido prototipo final.

ISSN: 2992-8338

4. PRUEBA EXPERIMENTAL PRELIMINAR

Para observar el desempeño del prototipo construido, se realizó una prueba experimental preliminar. El objetivo de la prueba fue determinar la fuerza que se requiere en el pistón del inersor para lograr un ciclo de trabajo. Para lo anterior se utilizó una máquina de ensayos universal de tensión y compresión, asimismo, se implementó un electroimán en la entrada del canal helicoidal del inersor para generar un campo magnético modificando la viscosidad y densidad del fluido magnetorreológico hasta un estado quasi-solidó.

a) **b)**

Figura 7. Análisis experimental preliminar. a) maquina universal de tensión y compresión, b) montaje del inersor con fluido con un electroimán para la variación del campo magnético.

4.1 Metodología

El ciclo de trabajo que se consideró para la prueba experimental es el siguiente: Posición de trabajo inicial del pistón (posición inferior), recorrido del pistón 70 *mm*, hasta llegar a una posición superior, retorno del pisto a su posición original, velocidad del recorrido 500 *mm/min*. Para cada prueba experimental, el ciclo de trabajo del pistón se repitió 10 veces, esto con el objetivo de asegurar repetitividad en el comportamiento del inersor. Se consideró como fluido de trabajo, fluido magnetorreológico MRF-122EG. Con la finalidad de aislar los desperfectos de maquinado y la fuerza de amortiguamiento producida por la fricción entre el pistón, bujes y el cilindro, se realizó una prueba inicial del prototipo del inersor sin fluido. Las pruebas experimentales realizadas al inersor son: sin fluido, con fluido y considerando un campo magnético generado por una intensidad de corriente eléctrica en el intervalo desde $0.5 \leq I \geq 3$ con incrementos de 0.5 Amperes (A).

4.2 Resultados

Los resultados del comportamiento experimental del inersor se muestran en la Fig. 8, se puede observar que a mayor intensidad de corriente eléctrica se requiere una fuerza mayor para desplazar el pistón. Esto se debe al cambio de las propiedades reológicas del fluido magnetorreológico al estar sometido a un campo magnético. Se puede concluir que para que el inersor propuesto tenga efecto (atenuación de la vibración) en un sistema vibratorio, es necesario que la fuerza de excitación sea superior a las fuerzas reportadas en la Fig. 8.

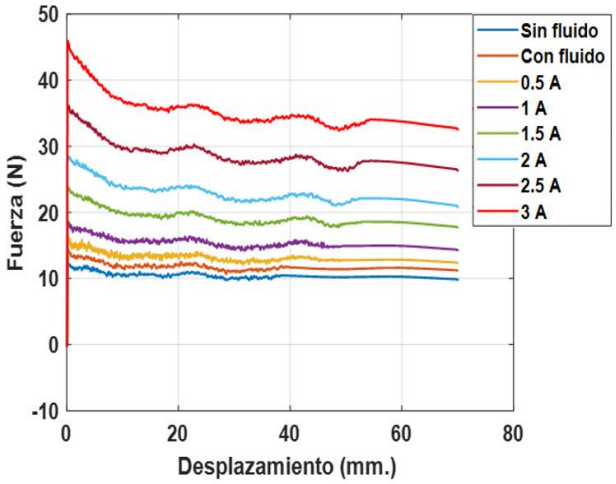


Figura 8. Prueba preliminar del prototipo de inersor con fluido considerando fluido magnetorreológico expuesto a diferente intensidad de corriente eléctrica.

5. CONCLUSIONES

Tomando como base la inertancia, ecuación (2) y las fuerzas de amortiguamiento, ecuación (12), se configuró un absorbedor de vibración tipo TMDI simulando su comportamiento y optimizando sus parámetros de diseño de acuerdo a una aplicación específica. Basado en el principio del funcionamiento del inersor con fluido y considerando las metodologías de los trabajos descritos en la Fig. 4, se realizó el diseño y la construcción del inersor con fluido reológico. De los resultados obtenidos se obtuvieron los parámetros de diseño del inersor propuesto y se realizó la construcción del inersor considerando materiales diamagnéticos con la finalidad de caracterizar el prototipo de forma experimental utilizando fluidos convencionales o fluidos magneto-rreológicos. Finalmente, se realizó el análisis experimental preliminar de del comportamiento del prototipo considerando fluido magnetorreológico como fluido de trabajo, sometiendo este a diferentes intensidades de campos magnéticos demostrado que al cambiar las propiedades del fluido magnetorreológico se aumenta la resistencia de flujo y por lo tanto aumenta su amortiguamiento.

ISSN: 2992-8338

REFERENCIAS

Asami, T. (2019) "Exact Algebraic Solution of an Optimal Double-Mass Dynamic Vibration Absorber Attached to a Damped Primary System", *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 141(5), pp. 1–13. Disponible en: https://doi.org/10.1115/1.4043815.

Barredo, E. *et al.* (2018) "Closed-form solutions for the optimal design of inerter-based dynamic vibration absorbers", *International Journal of Mechanical Sciences*, 144, pp. 41–53. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.05.025.

Batou, A. y Adhikari, S. (2019) "Optimal parameters of viscoelastic tuned-mass dampers", *Journal of Sound and Vibration*, 445, pp. 17–28. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.01.010.

Brzeski, P. *et al.* (2017) "Experimental study of the novel tuned mass damper with inerter which enables changes of inertance", *Journal of Sound and Vibration*, 404, pp. 47–57. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.05.034.

Cheung, Y.L. y Wong, W.O. (2011) "H2 optimization of a non-traditional dynamic vibration absorber for vibration control of structures under random force excitation", *Journal of Sound and Vibration*, 330(6), pp. 1039–1044. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.10.031.

Constantinou, M. *et al.* (1998) "Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit", *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*, (1), p. 320. Disponible en: http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Passive-Energy-Dissipation-Systems-for-Structural-Design-and-Retrofit-MCEER-98-MN01.html.

Hu, Y. *et al.* (2015) "Analysis and optimisation for inerter-based isolators via fixed-point theory and algebraic solution", *Journal of Sound and Vibration*, 346(1), pp. 17–36. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.02.041.

Jin, X. *et al*. (2016) "Minimization of the beam response using inerter-based passive vibration control configurations", *International Journal of Mechanical Sciences*, 119, pp. 80–87. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.10.007.

Kim, S.Y. y Lee, C.H. (2018) "Optimum design of linear multiple tuned mass dampers subjected to white-noise base acceleration considering practical configurations", *Engineering Structures*, 171(May), pp. 516–528. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.002.

Liu, X. *et al.* (2018) "Model identification methodology for fluid-based inerters", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 106, pp. 479–494. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.01.018.

Smith, M.C. *et al*. (2012) "Force-Controlling Hydraulic Device". Disponible en: US 2012/0199428A1.

Marian, L. y Giaralis, A. (2014) "Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 38, pp. 156–164. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2014.03.007.

Nishihara, O. (2019) "Exact Optimization of a Three-Element Dynamic Vibration Absorber: Minimization of the Maximum Amplitude Magnification Factor", *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 141(1). Disponible en: https://doi.org/10.1115/1.4040575.

Papageorgiou, C. *et al.* (2009) "Experimental testing and analysis of inerter devices", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 131(1), pp. 1–11. Disponible en: https://doi.org/10.1115/1.3023120.

Pastia, C. *et al.* (2005) "Structural control systems implemented in civil engineering", *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*, LI (LV)(1–2), pp. 41–49.

Ren, M.Z. (2001) "A variant design of the dynamic vibration absorber [3]", *Journal of Sound and Vibration*, 245(4), pp. 762–770. Disponible en: https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3564.

Schmelzer, B. *et al.* (2010) "Efficiency of tuned mass dampers with uncertain parameters on the performance of structures under stochastic excitation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 224(4), pp. 297–308. Disponible en: https://doi.org/10.1243/1748006XJRR310.

Shen, Y. *et al.* (2016) "Modeling and Optimization of Vehicle Suspension Employing a Nonlinear Fluid Inerter", *Shock and Vibration*, 2016. Disponible en: https://doi.org/10.1155/2016/2623017.

Shen, Y. *et al.* (2019) "Optimal design and experimental research of vehicle suspension based on a hydraulic electric inerter", *Mechatronics*, 61(January), pp. 12–19. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.05.002.

Sims, N.D. *et al.* (2018) "Semi-active inerters using magnetorheological fluid: a feasibility study", (March), p. 52. Disponible en: https://doi.org/10.1117/12.2300749.

Smith, M.C. (2002) "Synthesis of mechanical networks: The inerter", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(10), pp. 1648–1662. Disponible en: https://doi.org/10.1109/TAC.2002.803532.

Smith, M.C. (2020) "The Inerter: A Retrospective", *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 3(1), pp. 361–391. Disponible en: https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023917.

Swift, S.J. *et al.* (2013) "Design and modelling of a fluid inerter", *International Journal of Control*, 86(11), pp. 2035–2051. Disponible en: https://doi.org/10.1080/00207179.2013.842263.

ISSN: 2992-8338

Study of Surface Damage of Turbine Components Removed from Service Due to Preventive Maintenance

Erika O. Avila-Dávila*, Edgar E. Vera-Cárdenas*, Armando I. Martínez-Pérez*, Marisa Moreno-Ríos*, Lizbeth Melo-Máximo**

** TecNM campus Pachuca (DEPI), C.P. 42080*
México (e-mail: erika.ad@pachuca.tecnm.mx)

*** TecNM campus Tlalnepantla (DEPI), C.P. 54070*
México

Abstract: In this study, the deterioration of the coating of a first stage blade of a land gas turbine (used to generate electrical energy), and, the damage of the coating of a fan blade of a gas turbine for aeronautical, were analyzed. Both elements were removed from service due to preventive maintenance. The analysis of the first stage blade (hollow blade of a land turbine) consisted first of a visual inspection, then a microstructural characterization was carried out in longitudinal and transversal sections of the component. Also, the damage in the cooling channels of the hollow blade was characterized. In the case of the solid blade, of a gas turbine for aeronautical, a visual inspection was carried out. It is important to mention that this element is not exposed to a hard environment (such as high temperature), so an X-ray computed tomography analysis facilitated the study of its surface deterioration. The results of the microstructural characterization allowed to identify that the wear of the coating of the first stage blade is not homogeneous, and it can be related to the high temperature in service operation of the component, which is different between the upper, middle and root sections of the blade. On the other hand, erosion and wear were observed on the fan blade, particularly at the leading edge, in the form of pits with different morphologies, in a major proportion in that section with the highest torsion angle in its geometry and at the root of the component due to the blade clamping. Finally, the results of the X-ray computed tomography study showed the occurrence of superficial microcavities, as a consequence of erosion by impacted particles that caused several circular pits.

Keywords: Surface Damage, Turbine Components, Microstructural Characterization, X-ray Computed Tomography.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de aumentar la eficiencia térmica en motores de turbinas de gas ha sido un tema de interés tecnológico y científico desde hace más de 50 años. En este sentido, es indispensable el desarrollo de nuevos sistemas de protección superficial para operar a temperaturas elevadas y contribuir, de esta manera, a incrementar la eficiencia de turbomaquinaria (Reed R. C., 2006; Giampaolo T., 2003). En la actualidad, varios componentes de turbinas de gas usan recubrimientos, particularmente aquellos localizados en zonas donde el sistema opera a elevada temperatura y en un ambiente severo por largos periodos de tiempo (Reed R. C., 2006; Aguero A., 2007). La forma de protección que ofrecen estos recubrimientos consiste, para algunos casos, en limitar la transferencia de calor al sustrato debida a los gases de combustión, y, en disminuir la difusión de elementos externos que contribuyen a la ocurrencia de oxidación (corrosión), es decir, los recubrimientos ayudan a prevenir fallas y prologan la vida útil del componente (Osorio J. D., Toro A., y Hernández J. P., 2012). Con respecto a los componentes de este estudio, es bien sabido que los álabes de primera etapa están expuestos a elevadas temperaturas durante su vida de servicio (estado estacionario), además de ser sometidos a ciclos de enfriamiento y calentamiento (estado transitorio) desde temperatura ambiente hasta temperaturas próximas a 1200 °C (Yañez P., Barceinas J. D. O., Poblano C. A., Medina J., Jiménez J. A. y Leon M., 2018). A su vez, sus geometrías de diseño suelen conducir a una distribución no uniforme de temperatura en su estructura interna, lo que puede originar tensiones internas y la aparición de grietas tanto en el recubrimiento como en el material base o sustrato (Reed R. C., 2006). No menos importante, los álabes en una turbina tanto internos (primera etapa) como externos (ventilador) son sometidos a elevados valores de fuerzas centrifugas en servicio. Además, debido a las condiciones de operación propias de las turbomáquinas, estos componentes afrontan un entorno severo de por ejemplo: azufre, entre otros elementos contaminantes (en el combustible), y, de humedad y sales (en el aire) promoviendo así la ocurrencia de problemas de corrosion (Giampaolo T., 2003). Debido a lo anterior, es de gran importancia realizar un mantenimiento preventivo periódico en ellos, para prevenir una falla catastrófica. Al respecto, se ha reportado que el 28 % de las fallas por mantenimiento en las turbinas de gas se debe particularmente a los álabes, entre otros componentes del rotor (Meher-Homji

ISSN: 2992-8338

C. B., y Gabriles G., 1998). Otro dato similar señala que el 25.5 % corresponde únicamente a las fallas en álabes (Giampaolo T., 2003). Una forma de restaurar áreas dañadas en álabes consiste en remover físicamente la sección deteriorada y remplazarla con una sección prefabricada. Por su parte, cuando ocurre agrietamiento generalmente se aplica soldadura. Ambos métodos son costosos debido a la tecnología aplicada (McGraw J., Van-Deventer G., Anton R., Burns A., 2006). En los últimos años, se ha promovido el desarrollo de métodos y técnicas sofisticadas para la deposición de recubrimientos en álabes con la intención de prolongar su vida útil. Sin embargo, es importante mencionar que su vida de servicio sigue siendo limitada debido a las características de diseño, propias de los álabes, y a las severas condiciones de operación antes mencionadas (Gonzalez S. A., 2006). Actualmente, los fabricantes han promovido el desarrollo de nuevas turbinas de gas modernas capaces de operar a 1500 °C, mediante el desarrollo y uso de nuevos materiales [Reed R. C., 2006; Nakamori M., Kayano I., Tsukuda Y., Takahashi K., y Torigoe T., 1997). Esto, muestra la importancia de poder operar a elevadas temperaturas, es decir, esta circunstancia promueve una mayor eficiencia en el desempeño de la turbina (Morales J., Mandujano A., y Torres J., 2013), y, resalta la importancia y el interés científico y tecnológico por entender los mecanismos del daño de recubrimientos con la intención de buscar mejoras en su diseño y desarrollo que incrementen su resistencia mecánica, y, su resistencia a temperaturas elevadas de operación, en ambientes severos. Finalmente, el objetivo de este estudio es evaluar el daño del recubrimiento en álabes de una turbina de gas terrestre (álabe de primera etapa) y de una turbina aérea (álabe del ventilador), retirados de servicio por mantenimiento preventivo. Se espera que este trabajo sea de utilidad para el desarrollo de nuevas investigaciones encaminadas a proponer alternativas de metodologías de reparación de cada componente, enfocadas en prolongar la vida útil de cada recubrimiento, o, en su caso, proponer alguna mejora en el diseño de éste que incremente su resistencia a la oxidación y su resistencia al desgaste, aumentando la durabilidad del componente y, en consecuencia, la eficiencia de la turbomáquina.

2. METODOLOGÍA

En ambos álabes de turbina, tanto terrestre como aérea, primero se realizó un análisis por inspección visual y luego se llevó a cabo la caracterización del daño superficial utilizando un microscopio óptico Olympus modelo GX41 (Fig. 1). Para ello, fue necesario hacer cortes longitudinales y transversales en cada componente y realizar la preparación metalográfica correspondiente. Cabe mencionar que, también se caracterizó el daño de los canales de enfriamiento del álabe hueco.

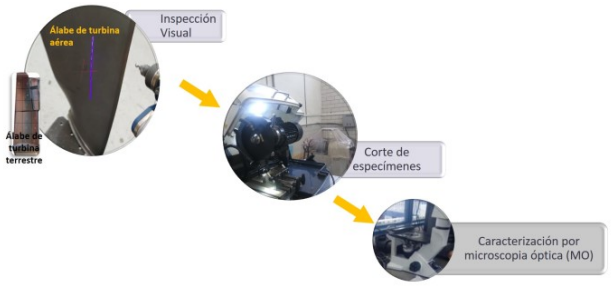


Figura 1. Etapas de la caracterización del daño superficial en cada álabe.

Ahora bien, los cortes hechos en cada componente estudiado se hicieron basados en; por una parte, las diferentes temperaturas de operación obtenidas en un estudio previo (Avila E. O., López V. M., Palacios L. M., Ramírez I., Vera E. E., Moreno M., Cueto M. M., Canto F. O., 2018) relacionado con el álabe de turbina terrestre. Por otra parte, el álabe de turbina aeronáutica se cortó a lo largo de su longitud, en la sección media del componente, y, también se llevaron a cabo cortes en los extremos, es decir, punta, región media y raíz, del borde de entrada. Lo anterior, debido a que visiblemente estas secciones mostraron evidencia de desgaste superficial. En todos los casos, se aclara que los cortes en ambos componentes eran necesarios para poder observarlos en los equipos usados para su caracterización microstructural. Para observar la microestructura superficial de cada componente se usó un reactivo químico compuesto de: 100 ml de HNO_3, 7 ml de HF y 11 ml de H_2O, y, de 100 ml de agua destilada, 2-6 ml de ácido nítrico al 65% y de 1-3 ml de ácido hidroflorídrico para el ataque químico del álabe terrestre y aéreo, respectivamente. Finalmente, en el caso específico del álabe de turbina aérea se realizó un estudio por tomografía computarizada de rayos-X, mismo que facilitó la observación de su deterioro superficial (Fig. 2). Las condiciones de operación del alabe de turbina terrestre son por mucho más severas que aquellas correspondientes al álabe de turbina aérea. De lo anterior, el daño superficial fue muy visible en el componente de primera etapa con respecto al componente aeronáutico, y, en consecuencia se consideró que la caracterización microstructural por microscopía para el componente de turbina terrestre es suficiente para analizar su deterioro.

Figura 2. Caracterización por tomografía de rayos-X computarizada (GE Phoenix v|tome|x m, nanoCT).

Cabe señalar que una de las principales ventajas del uso de tomografía computarizada de rayos-X es que esta técnica de

ISSN: 2992-8338

caracterización no requiere de una preparación metalográfica de especímenes, es decir, la muestra por analizarse solo necesita cortarse, o colocarse completa según el estudio, en el interior de este equipo para su valoración (Avila E. O., Palacios L. M., Canto F. O., López V. M., Saucedo M. L., Cayetano N., Dorantes H. J., 2021).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Inspección visual del álabe de turbina terrestre

Como resultado de la inspección visual del componente se identificó con claridad deterioro en la sección media, a lo largo de su lado cóncavo (Fig. 3).

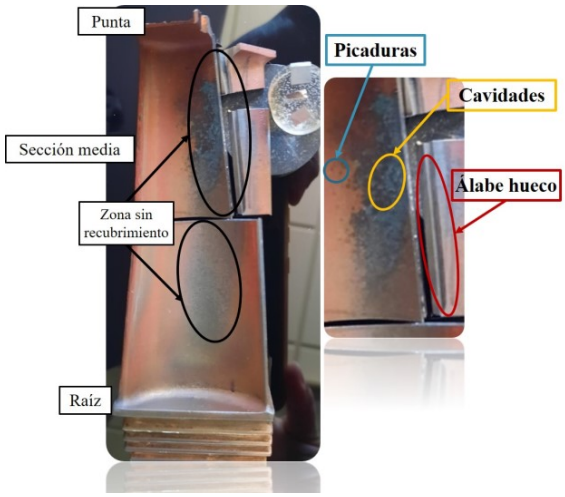


Figura 3. Inspección visual del lado cóncavo del álabe de primera etapa.

En un trabajo previo de caracterización dinámica en estado estacionario del álabe (Avila E. O., López V. M., Palacios L. M., Ramírez I., Vera E. E., Moreno M., Cueto M. M., Canto F. O., 2018), se identificó que el valor de temperatura de operación más alta a la que se expone el componente ocurre en la sección media del mismo, alcanzando valores de hasta 937 °C, luego le sigue en valor la punta y al final con el valor más bajo, ~700 °C, la sección de la raíz del componente. En consecuencia, visiblemente puede apreciarse, como resultado de la inspección visual, que el deterioro superficial es mayor (inclusive hay una zona sin recubrimiento) en la región media del componente expuesta al valor más alto de temperatura de servicio, y, que posiblemente *el daño superfiacial en este recubrimiento guarda una estrecha relación con el valor de la temperatura de operación del componente*. También, fueron visibles algunas marcas caracteristicas de picaduras distribuidas sobre toda la superficie del lado cóncavo del álabe, lo que puede ser evidencia de la ocurrencia del fenómeno de corrosión. En los bordes de entrada y de salida se observaron cavidades y picaduras, particularmente en el borde de entrada se identificó mayor evidencia de deterioro superficial. En lo que respecta al lado convexo (Fig. 4), y similar al desgaste observado en el lado cóncavo, es evidente un cambio en el color superficial, gris, en la sección media del componente, es decir, en esta sección ya no hay recubrimiento. En un estudio realizado por Bogdan M., Błachnio J., Kułaszka A., y Zasada D. (2021) fueron identificados cambios de color en la superficie de un álabe, los autores realacionaron estos cambios con el deterioro en el recubrimiento. Las rayas continúas observadas en la superficie de este álabe posiblemente se deban a la dirección del flujo del gas caliente a la entrada del componente generando un adelgazamiento de material y/o decoloración. Por su parte, es posible que las rayas discontinuas se deban a la ocurrencia de erosion superficial. En un estudio sobre la identificación del modo de falla en un álabe, Rani S., Agrawal A. K., y Rastogi V. (2018) concluyeron que ésta se debió al efecto combinado de erosión, sobrecalentamiento y corrosión en caliente, lo que podría ser similar a los fenómenos ocurridos en la superficie del álabe de primera etapa, según los resultados de estas primeras observaciones.

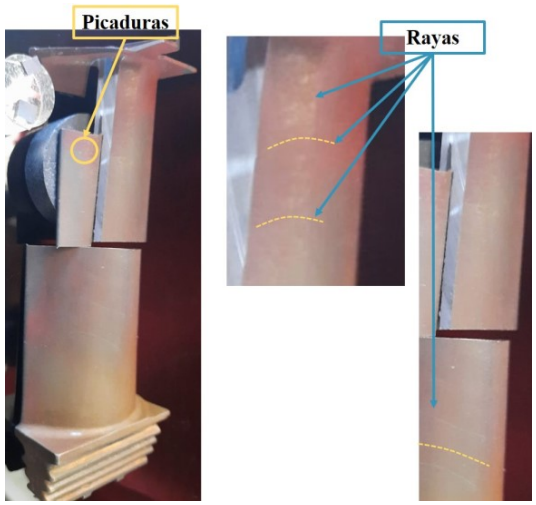


Figura 4. Inspección visual del lado convexo del álabe de primera etapa.

3.2 Inspección visual del álabe de turbina aérea

Como resultado de la inspección visual fue identificada la ocurrencia de daño superficial en la sección del borde de entrada, particularmente en la región de la punta del componente (Fig. 5). A diferencia del álabe de turbina terrestre, en este caso no se identificó un importante cambio en el color del álabe, así como tampoco gran cantidad de daño visible que implique la ocurrencia de varias cavidades y rayas tan notorias como en el caso correspondiente al componente de primera etapa de una turbina terrestre, aunque si hay deterioro. Esta diferencia es atribuida a las condiciones ambientales a las que se expone el álabe de turbina aérea del ventilador, que claramente son muy diferentes de aquellas a las que se expone un álabe de primera etapa.

ISSN: 2992-8338

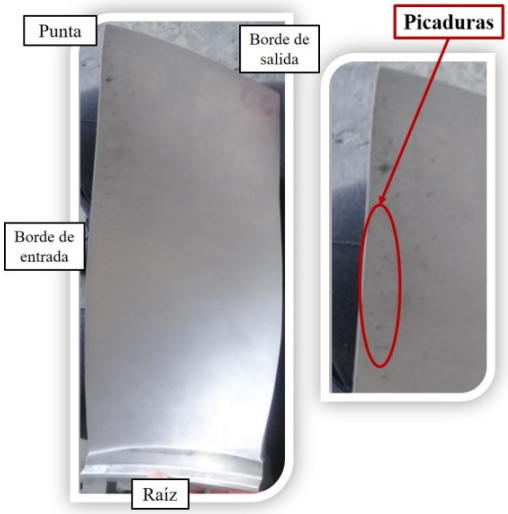


Figura 5. Inspección visual del álabe de turbina aérea.

3.3 Caracterización microestructural del álabe de turbina terrestre

Los resultados de la caracterización microstructural obtenida por microscopía óptica del álabe de primera etapa coinciden con los resultados obtenidos de la inspección visual (Fig. 6). Por simplicidad, se muestra solo el daño superficial del componente en su sección media a lo largo de su longitud. Claramente, el deterioro superficial no es homogéneo y parece estar relacionado con la temperatura de operación del componente, es decir, a mayor temperatura de servicio mayor fue, cualitativamente, la cantidad de daño en el recubrimiento. Así, es de notarse que la sección de punta y raíz del álabe aún tienen restos de recubrimiento, no así para la sección de la zona media particularmente del lado de presión del componente.

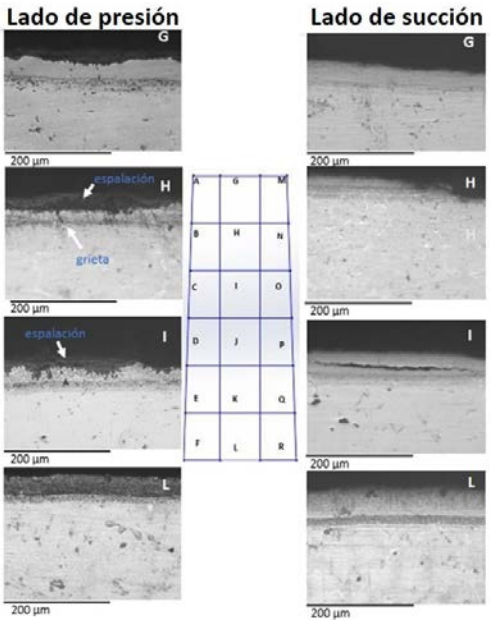


Figura 6. Caracterización microstructural superficial del álabe de turbina terrestre.

Es de notarse que, en el lado de presión el agrietamiento alcanzó el sustrato o material base a partir del cual se fabricó el componente; no así para el lado de succión, en cuyo caso se aprecia una región muy pequeña, Fig. 6H, del lado superior derecho, sin recubrimiento, pero, en apariencia sin la ocurrecia de agrietamiento.

En lo que respecta a los canales de enfriamiento, los resultados muestran un importante deterioro superficial en el componente (Fig. 7).

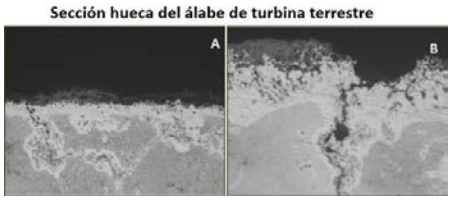


Figura 7. Caracterización microstructural interna (sección hueca) del álabe de turbina terrestre.

Es evidente que en la sección interna hueca del álabe conocida como canales de enfriamiento, el daño al recubrimiento es mayor. Estas observaciones podrían relacionarse con el fuerte choque térmico al que el componente es expuesto durante su vida de servicio, mismo que es mayor en esta sección del componente con respecto a la sección superficial, como se mostró en Avila E. O., Palacios L. M., Canto F. O., López V. M., Saucedo M. L., Cayetano N., Dorantes H. J. (2021), referente al daño en el sustrato en la etapa transitoria de la turbina.

3.4 Caracterización microestructural del álabe de turbina aérea

Los resultados de la caracterización microstructural del álabe de turbina aérea obtenidos por microscopía óptica no mostraron daño severo al recubrimiento. No obstante, los resultados de la caracterización por tomografía computarizada de rayos-X evidenciaron con claridad la ocurrencia de una superficie craquelada (Fig. 8) con impactos circulares y algunos con huellas de arrastre de partículas, además de microcavidades. Por simplicidad, solo se muestra el daño superficial del álabe en dos secciones, cerca de la raíz y punta del componente, referentes a las zonas que visiblemente mostraron mayor deterioro superficial obtenidas del lado de presión y en el borde de entrada. *El daño identificado con ésta técnica puede atribuirse únicamente al deterioro en el recubrimiento. Lo anterior, dado que se realizaron cortes de las imágenes del componente y hacia su interior sin obtener evidencia de agrietamiento del sustrato*.

ISSN: 2992-8338

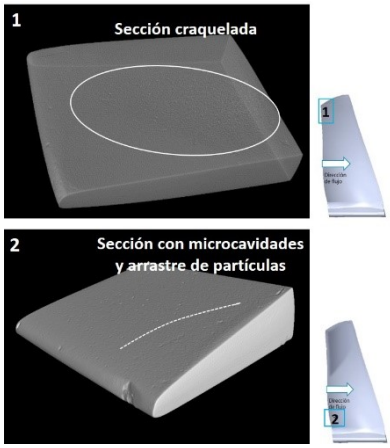


Figura 8. Caracterización superficial del álabe de turbina aérea obtenida por tomografía computarizada de rayos-X.

5. CONCLUSIONES

Como resultado del estudio del daño superficial de álabes retirados de servicio por mantenimiento preventivo, para el caso de aquel correspondiente a la primera etapa de una turbina terrestre se concluye que:

A. El daño superficial en el recubrimiento guarda una estrecha relación con el valor de la temperatura de operación del componente, se hace necesario, como trabajo futuro, continuar el estudio para verificar por DR-X, por ejemplo, la ocurrencia de corrosion en caliente mediante la identificación de cambios en las fases identificadas en el recubrimiento, antes y después de la vida de servicio del componente.

B. La sección interna, hueca, del álabe presentó mayor cantidad de daño. Estas observaciones podrían relacionarse con el fuerte choque térmico al que se somete el recubrimiento interno durante su vida de servicio.

Por su parte, en el caso del álabe de turbina aérea se concluye que:

A. La ocurrencia de mayor cantidad de daño superficial se observó en la sección del borde de entrada, particularmente en la región de la punta del componente. No obstante, los resultados de la caracterización microstructural por microscopía óptica no mostraron daño severo al recubrimiento.

B. Mediante el estudio por tomografía computarizada de rayos-X se identificó la ocurrencia de una superficie craquelada con impactos circulares y algunos con huellas de arrastre de partículas, además de microcavidades. Es importante destacar que con esta técnica puede concluirse que el *daño identificado ocurrió solo al recubrimiento. Lo anterior, dado que se realizaron cortes de las imágenes del componente y hacia su interior sin obtener evidencia de agrietamiento del sustrato*.

Finalmente, se espera poder realizar como trabajo futuro un estudio cinético por simulación de la ocurrencia de transformaciones de fase que toman lugar en el recubrimiento del álabe de primera etapa, que coadyuve a proponer la inclusion de, por ejemplo, un tratamiento al recubrimiento que pueda retrasar dicha transformación. Por su parte, en el álabe de turbina aérea se espera poder hacer, como trabajo futuro, un estudio relativo al espesor del recubrimiento en sus diferentes secciones (punta, zona media y raíz del álabe) y analizar las propiedades tribológicas del mismo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del TecNM a través del proyecto 18240.23-P; así como el trabajo de preparación realizado por las estudiantes de nivel maestría Flor Citlaly Reyes Ríos e Ixchel Monroy Sáchez.

REFERENCIAS

Reed R. C. (2006). *The Superalloys Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, U.S.A.

Giampaolo T. (2003). *The gas turbine Handbook: Principales and practices*, G. The Fairmont Press, U.S.A.

Aguero A. (2007). Recubrimientos contra la corrosión a alta temperatura para componentes de turbina de gas. *Revista de Metalurgia*, vol. 43 (5), p. 384-398.

Osorio J. D., Toro A., y Hernández J. P. (2012). Thermal Barrier Coatings for gas turbine applications: Failure mechanisms and key microstructural features. *Dyna*, vol. 79 (176), pp. 149-158.

Yañez P., Barceinas J. D. O., Poblano C. A., Medina J., Jiménez J. A. y Leon M. (2018). Estudio del perfil de esfuerzos residuales en recubrimientos de térmica para turbinas de gas. *Dyna New Technologies*, vol. 69 (4), pp. 1-10.

Meher-Homji C. B., y Gabriles G. (1998). Gas turbine blade failures- causes, avoidance, and troubleshooting. *Texas A&M University Libraries*, vol. 27015, pp. 129-180.

McGraw J., Van-Deventer G., Anton R., Burns A. (2006). Advancements in gas turbine vane repair. *ASME Power*, pp. 1-5.

Gonzalez S. A. (2006). Caractrización microestructural y mecánica de barreras térmicas por APS y EB-PVD degradadas por fatiga térmica y por contacto, DIM*, Tesis de Grado*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Nakamori M., Kayano I., Tsukuda Y., Takahashi K. y Torigoe T. (1997). Hot corrosion and its prevention in high temperature heavy oil firing gas turbines. *Materials Science Forum*, vol. 251 a 254, pp. 633-640.

Morales J., Mandujano A., Torres J. (2013). Velocidad de corrosión de recubrimientos obtenidos por rociado térmico para su aplicación en turbinas de vapor geotérmico. *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*. En Valdez Salas B, & Schorr

ISSN: 2992-8338

Wiener M (Eds.). OmniaScience, pp. 225-297, Barcelona, España.

Avila E. O., López V. M., Palacios L. M., Ramírez I., Vera E. E., Moreno M., Cueto M. M., Canto F. O. (2018). Evaluación del Deterioro Microestructural de una Superaleación Componente de una Turbina de Gas. *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*, vol. 15, pp. 1-8.

Avila E. O., Palacios L. M., Canto F. O., López V. M., Saucedo M. L., Cayetano N., Dorantes H. J. (2021). Evaluation of Microstructural Deterioration for a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy by X-ray Computed Tomography. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30 (1), pp. 727-742.

Bogdan, M.; Błachnio, J.; Kułaszka, A.; Zasada, D. (2021). Investigation of the Relationship between Degradation of the Coating of Gas Turbine Blades and Its Surface Color. *Materials*, vol. 14 (24), 7843.

Rani S., Agrawal A. K., y Rastogi V. (2018). Failure investigations of a first stage Ni based super alloy gas turbine blade. *Materials Today: Proceedings,* vol. 5 (1), pp. 477-486.

ISSN: 2992-8338

Analysis of mechanical networks as TID devices to reduce the vibration generated by unbalance in rotordynamics systems

Javier Antonio Pérez Molina, Jorge Colín Ocampo, Andrés Blanco Ortega, Cuauhtémoc Mazón Valadez, Demetrio Pérez Vigueras.

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (cenidet). Interior internado Palmira, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México (Tel. 348-107-9322; correos: m22ce032@cenidet.tecnm.mx, jorge.co@cenidet.tecnm.mx, , andres.bo@cenidet.tecnm.mx, d17ce022@cenidet.tecnm.mx, demetrioperez16m@cenidet.edu.mx)

Abstract: The present paper deals with the problem of vibration induced by unbalance in rotor systems, through a mass-spring model which includes the gyroscopic effects. Using the concept of mechanical admittance, the spring-mass model with gyroscopic effects was extended to include the TID devices in order to control the vibration response in the resonance. The optimum response was generated employing the fixed points optimization method, getting closed form solutions for optimum parameters. It is demonstrated that TID devices reduce the vibration amplitude induced by unbalance and a stable behavior in the resonance is got.

***Keywords*:** rotor, gyroscopic effects, inerter, TID, admittance, optimization, fixed points.

1. INTRODUCCIÓN

Las vibraciones son un fenómeno presente en todo tipo de máquinas y, en maquinaria rotativa tienen gran importancia al momento de realizar un diseño o de establecer la velocidad de operación. Un criterio de diseño para estos equipos consiste en establecer la frecuencia de giro alejada de la frecuencia natural del sistema, con el fin de evitar la resonancia, la cual es un caso de vibración que ocurre en sistemas rotodinámicos cuando la frecuencia de giro coincide con la frecuencia natural del sistema principal. En resonancia el sistema experimenta grandes oscilaciones y si no se cuenta con un dispositivo de control de vibraciones el sistema fallará como resultado de los grandes esfuerzos generados en cada uno de sus componentes mecánicos (Lalanne and Ferraris, 1998; S. Rao, 2012; Vance, 1988). La frecuencia natural de un sistema rotodinámico se ve afectada por el comportamiento que toman los componentes mecánicos al estar girando, por lo tanto, tomar en cuenta el fenómeno de los efectos giroscópicos en los sistemas rotodinámicos es de gran importancia, ya que estos afectan la respuesta dinámica del sistema, cambiando la frecuencia natural. Asimismo, el fenómeno del desbalance es un problema que se presenta en los sistemas rotatorios y, se manifiesta cuando el centro de gravedad no coincide con el centroide del eje, lo que provoca fuerzas de excitación que son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad de giro del sistema, generando vibraciones que pueden ser perjudiciales para el rotor (S. Rao, 2012).

Para el control de vibraciones en estructuras se han empleado amortiguadores y dispositivos de control de vibración tales como: absorbedores dinámicos sintonizados, aisladores de vibración y disipadores de energía. Desde las últimas décadas se han incluido dispositivos con base en inersores. Smith introdujo al inersor como un elemento que entrega una fuerza proporcional a la aceleración de sus dos terminales (Smith, 2002). Desde su introducción, este elemento ha sido estudiado para el control de vibraciones de diversos sistemas, como en el área de la ingeniería civil para el control de vibración en edificios (Hwang et al., 2007; Pradono et al., 2008), en el área automotriz para lograr un mejor desempeño en la suspensión de automóviles (Sun et al., 2016), así como siendo incorporado en sistemas de control pasivo para optimizar la respuesta vibración.

En la literatura referente sistemas de control pasivo con base en inersores, se reporta la implementación de redes mecánicas basadas en inersor incorporadas en el absorbedor dinámico de vibración convencional, formando así deferentes configuraciones de IDVA (Inerter-based Dynamic Vibration Absorbers) (Hu and Chen, 2015); En esta investigación se presentan los beneficios obtenidos, al comparar la respuesta de los absorbedores con base en inersor contra el modelo del absorbedor convencional. Los IDVA se han aplicado además en diferentes modelos, como en elementos tipo viga que describen el comportamiento de puentes (Ebrahimnejad and Samani, 2020), para la disminución de vibraciones inducidas por vórtices en alabes de aerogeneradores (K. Xu et al., 2019), y también mediante los denominados Tuned Mass Inerter Dampers para el control de elementos flexibles sujetos a cargas estocásticas (Marian and Giaralis, 2014).

Las ventajas que presentó el inersor hicieron que diversos investigadores centraran sus estudios en la aplicación de inersores en la mejora de dispositivos de control de vibraciones pasivos. No obstante, en el área de rotodinámica el inersor no se ha abordado de forma amplia como sucede con otras áreas de la ingeniería, sin embargo, se han desarrollado investigaciones utilizando los absorbedores dinámicos de vibración convencionales para reducir las vibraciones en máquinas rotativas como lavadoras (Campos and Nicoletti,

ISSN: 2992-8338

2015). En sistemas rotodinámicos, los DVA se han empleado utilizando elementos viscoelásticos (Fontes and Nicoletti, 2016) y discos magnéticos(Hu and He, 2017; Yao et al., 2018, 2016). En la literatura se reportan estudios sobre el control de vibraciones inducidas por flujo del fluido lubricante de los cojinetes en sistemas rotodinámicos, incorporando absorbedores dinámicos de vibración convencionales y absorbedores con base en inersor (Q. Xu et al., 2019; Xu et al., 2018). Por otra parte, Mendoza *et al.* (Mendoza-Larios et al., 2022) proponen la aplicación de un absorbedor no tradicional para el control de vibración de un sistema vibratorio (sistema masa-resorte) considerando fuerzas inerciales como fuerzas de excitación.

De acuerdo con el estudio del estado del arte realizado, no se encontraron investigaciones o análisis del efecto y aplicación de sistemas TID (Tuned Inerter Damper) en el comportamiento dinámico de sistemas rotodinámicos. Por lo tanto, en este estudio se propone un modelo matemático de un sistema rotodinámico de dos grados de libertad incorporando efectos giroscópicos y considerando dispositivos TID para el control de la vibración debida a fuerzas de excitación generadas por desbalance.

2. MODELADO DE SISTEMAS ROTODINÁMICOS

2.1 Modelo equivalente masa-resorte de un sistema rotodinámico

Con base en la teoría reportada en la literatura sobre análisis y modelado de sistemas rotodinámicos (Lalanne and Ferraris, 1998), las ecuaciones de movimiento se obtienen mediante el cálculo de la energía cinética y potencial del rotor y la aplicación de la ecuación de Euler-Lagrange. En la Figura 1 se presenta un sistema rotodinámico de dos discos equidistantes que se modela como un sistema masa-resorte equivalente para el primer modo de vibración. En la Tabla 1 se muestran sus parámetros geométricos y las propiedades del material consideradas.

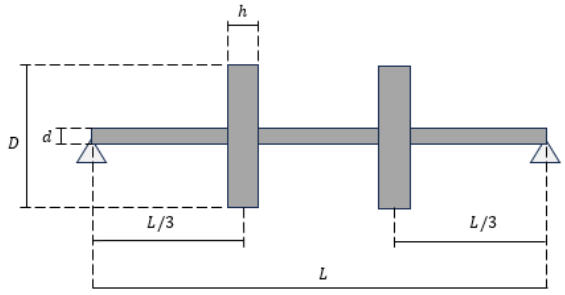


Figura 1. Sistema rotodinámico con dos discos equidistantes.

Tabla 1. Propiedades y parámetros del sistema rotodinámico.

Propiedades del material	Eje	Discos
$\rho = 7800\ \frac{kg}{m^3}$	$L = 0.4\ m$	$D = 0.3\ m$
$E = 2E11\ Pa$	$d = 0.02\ m$	$h = 0.03\ m$

Como resultado de la aplicación de la metodología de Lalanne y Ferraris (Lalanne and Ferraris, 1998) y considerando simetría geométrica en el eje y en los coeficientes del soporte en las direcciones q_1, q_2, se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales de movimiento del análisis modal Ecs (1) y (2).

$$M\ddot{q}_1(t) - a\omega\dot{q}_2(t) + Kq_1(t) = m_d\omega^2 d\ sen(\omega t) \quad (1)$$

$$M\ddot{q}_2(t) + a\omega\dot{q}_1(t) + Kq_2(t) = m_d\omega^2 d\ cos(\omega t) \quad (2)$$

En las Ecs. (1) y (2) M representa la masa modal del rotor, a es el coeficiente de efectos giroscópicos, K es la rigidez modal del rotor, m_d es la masa de desbalance, d es la excentricidad del desbalance, ω es la velocidad de giro del rotor y $q_i, \dot{q}_i\ y\ \ddot{q}_i$ denotan posición, velocidad y aceleración en la dirección q_i para $i = 1,2$. La coordenada q_i hace referencia a coordenadas generalizadas ortogonales y transversales al eje del rotor. Las ecuaciones de movimiento (1) y (2) se pueden representar por un sistema equivalente masa-resorte que incorpora efectos giroscópicos, como el que se muestra en la Figura 2.

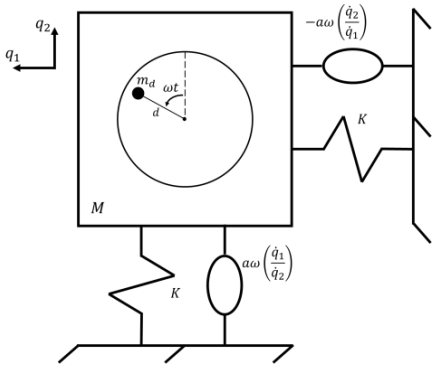


Figura 2. Modelo equivalente del rotor como sistema masa-resorte de 2 GDL con influencia de efectos giroscópicos.

2.2 Modelo masa-resorte incorporando dispositivos TID.

Los dispositivos TID se representan mediante las redes mecánicas de la Figura 3. Utilizando el concepto de admitancia mecánica (Hu and Chen, 2015) se obtienen coeficientes que representan el comportamiento de cada red modeladas como un amortiguador equivalente en el dominio de la frecuencia.

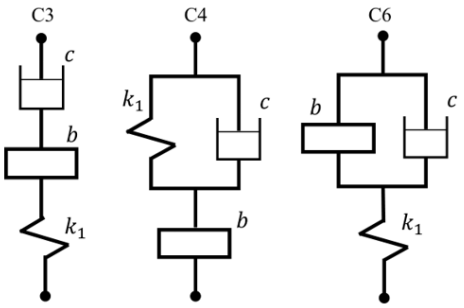


Figura 3. Redes mecánicas de TID.

ISSN: 2992-8338

Las Ecs. (3)-(5) expresan los coeficientes de amortiguamiento equivalente de cada configuración de red C_3, C_4 y C_6.

$$Y_3 = \frac{\mathrm{j}\omega K_1 cb}{(K_1 - b\omega^2)c + j\omega K_1 b} \tag{3}$$

$$Y_4 = \frac{-cb\omega^2 + j\omega K_1 b}{K_1 - b\omega^2 + j\omega c} \tag{4}$$

$$Y_6 = \frac{K_1(c + jb\omega)}{K_1 - b\omega^2 + jc\omega} \tag{5}$$

El sistema rotodinámico incorporando un elemento de admitancia (o amortiguador equivalente) se puede representar mediante un sistema equivalente masa-resorte-amortiguador equivalente con efectos giroscópicos, como el que se muestra en la Figura 4.

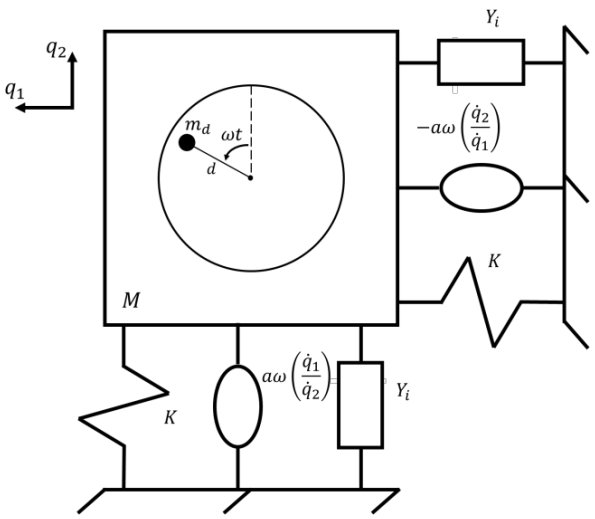


Figura 4. Sistema equivalente masa-resorte-amortiguador equivalente con influencia de efectos giroscópicos.

Las ecuaciones de movimiento del sistema de la Figura 4 se presentan en las Ecs. (6) y (7). Para la solución del sistema de ecuaciones, se proponen soluciones de tipo exponencial, Ecs. (8) y (9).

$$M\ddot{q}_1(t) - a\omega\dot{q}_2(t) + Y_i\dot{q}_1(t) + Kq_1(t) = m_d\omega^2 d\, sen(\omega t) \tag{6}$$

$$M\ddot{q}_2(t) + a\omega\dot{q}_1(t) + Y_i\dot{q}_2(t) + Kq_2(t) = m_d\omega^2 d\, cos(\omega t) \tag{7}$$

$$q_1 = Q_1 e^{j\omega t} \tag{8}$$

$$q_2 = Q_2 e^{j\omega t} \tag{9}$$

Para la solución del sistema de ecuaciones (6) y (7) se proponen las siguientes variables adimensionales:

$$G_1 = \frac{MQ_1}{m_d d} \qquad G_2 = \frac{MQ_2}{m_d d} \qquad \delta = \frac{b}{M} \qquad \gamma = \frac{\omega_b}{\omega_n}$$

$$\zeta = \frac{c}{2M\omega_n} \qquad \phi = \frac{a}{M} \qquad \Omega = \frac{\omega}{\omega_n}$$

Donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \qquad \omega_b = \sqrt{\frac{K_1}{b}}$$

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones (6) y (7) en forma adimensional, se expresa de forma matricial mediante la Ec. (10).

$$\begin{bmatrix} -\Omega^2 + \frac{j\,Y_i\,\Omega}{\omega_n\,M} + 1 & \phi\Omega^2 \\ \phi\Omega^2 & -\Omega^2 + \frac{j\,Y_i\,\Omega}{\omega_n\,M} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega^2 \\ \Omega^2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Las FRF (funciones de respuesta en frecuencia) en las direcciones q_1, q_2 se obtienen de la solución de la ecuación (10). Debido a las condiciones de simetría geométrica del eje y de soportes del rotor, las FRF se reducen a una única expresión, que se puede representar como:

$$G_1 = G_2 = G = -\frac{A + Bj}{C + Dj} \tag{11}$$

Donde:

$$A = \Omega^2\left(-\left((\phi + 1)\Omega^2 - 1\right)M^2{\omega_n}^2\right)$$

$$B = \Omega^3 M\omega_n Y_i$$

$$C = \left((\phi - 1)\Omega^2 + 1\right)\left((\phi + 1)\Omega^2 - 1\right)M^2\omega_n^2 + \Omega^2 Y_i^2$$

$$D = 2\,j\Omega Y_i(\Omega + 1)M(\Omega - 1)\omega_n$$

Sustituyendo las expresiones de Y_3, Y_4 y Y_6 en la ecuación (11) y calculando el módulo del número complejo se obtiene la FRF para cada red mecánica, Ec. (12).

$$|G| = \sqrt{\frac{A_{TID\,Ci} + B_{TID\,Ci}}{C_{TID\,Ci} + D_{TID\,Ci}}}\,, \qquad i = 3, 4, 6 \tag{12}$$

Donde:

$$A_{TID\,C3} = 4\Omega^4(\Omega - \gamma)^2(\Omega + \gamma)^2\zeta^2.$$
$$B_{TID\,C3} = \gamma^4\Omega^6\delta^2.$$
$$C_{TID\,C3} = 4\zeta^2\left((\Omega^4 - \gamma^2\Omega^2)\phi + \delta\Omega^2\gamma^2 + (\Omega^2 - 1)\gamma^2 - \Omega^4 + \Omega^2\right)^2.$$
$$D_{TID\,C3} = \gamma^4\delta^2\Omega^2(\Omega^2\phi - \Omega^2 + 1)^2$$

ISSN: 2992-8338

$A_{TID\ C4} = \delta^2\Omega^4(\Omega-\gamma)^2(\Omega+\gamma)^2.$
$B_{TID\ C4} = 4\zeta^2\Omega^6.$
$C_{TID\ C4} = (\delta(\gamma^2\Omega^2(\delta-\phi+1)+\Omega^4(\phi-1)+\Omega^2-\gamma^2))^2.$
$D_{TID\ C4} = 4\zeta^2\Omega^2(\Omega^2(\delta-\phi+1)-1)^2$

$A_{TID\ C6} = 4\Omega^6\zeta^2.$
$B_{TID\ C6} = \delta^2\Omega^4(\gamma^2-\Omega^2)^2.$
$C_{TID\ C6} = 4\zeta^2\Omega^2(\gamma^2\delta+\Omega^2(\phi-1)+1)^2.$
$D_{TID\ C6} = \delta^2(\gamma^2\Omega^2(\delta+1-\phi)+\Omega^4(\phi-1)+\Omega^2-\gamma^2)^2.$

3. METODOLOGÍA DE LOS PUNTOS INVARIANTES

El método de optimización de puntos invariantes (Den Hartog, 1947) se basa en la calibración a la misma amplitud de dos puntos de la función G que se encuentran en las cercanías de los máximos de la función. Este método tiene como objetivo optimizar la función minimizando la amplitud de respuesta en los puntos invariantes. Dichos puntos invariantes (P, Q en la Figura 5) son independientes de la relación de amortiguamiento ζ, y se identifican al evaluar la función G en sus comportamientos límites cuando $\zeta = 0$ y cuando $\zeta \to \infty$. Figura 5.

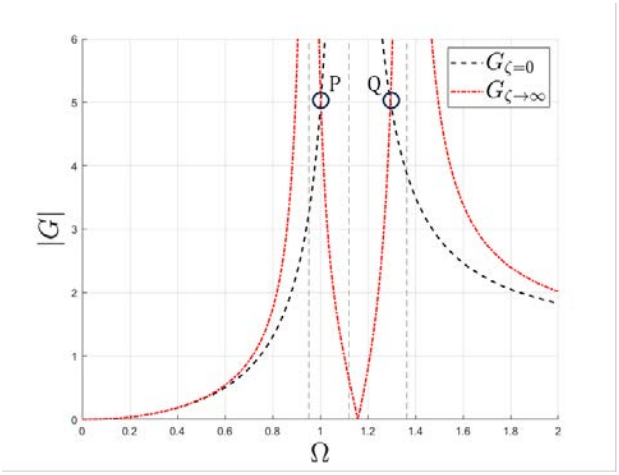


Figura 5. Sintonización de los puntos invariantes a la misma amplitud, utilizando la función G del TID C3 para el modelo rotodinámico de la Figura 1 con parámetros $\phi = 0.2043$ y $\delta = 0.1$.

La relación de amortiguamiento se calcula bajo el criterio de Krenk (Mendoza-Larios et al., 2022), evaluando la función G en la frecuencia de resonancia del sistema masa-resorte de un grado de libertad, obtenido al hacer que ζ tienda a cero o infinito, e igualando la amplitud con la de los puntos invariantes. La Figura 6 presenta la gráfica de respuesta optimizada del TID C3. Las Ecs. (13)-(14) presentan los parámetros óptimos del TID C3. Las Ecs. (15)-(16) corresponden a los parámetros óptimos del TID C4 y las Ecs. (17)-(18) denotan los parámetros óptimos del TID C6.

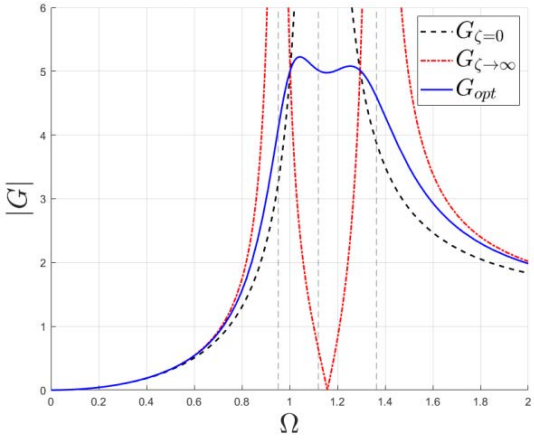


Figura 6. Respuesta optimizada, empleando el TID C3 (Línea color azul) en el modelo rotodinámico de la Figura 1 con parámetros $\phi = 0.2043$ y $\delta = 0.1$.

$$\gamma_{opt\ TID\ C3} = \frac{2}{\sqrt{4-2(\delta+2\phi)}} \quad (13)$$

$$\zeta_{\text{opt TID C3}} = \frac{\sqrt{\delta}\sqrt{1-\phi}}{\sqrt{8-8\phi-\delta}} \quad (14)$$

$$\gamma_{opt\ TID\ C4} = \frac{1}{\sqrt{1-\phi+\delta}} \quad (15)$$

$$\zeta_{opt\ TID\ C4} = \frac{\sqrt{2}\delta^{\frac{3}{2}}}{2(1-\phi+\delta)} \quad (16)$$

$$\gamma_{opt\ TID\ C6} = \frac{-\sqrt{1-\phi-4\delta}+\sqrt{1-\phi}}{2\delta} \quad (17)$$

$$\zeta_{opt\ TID\ C6} = \frac{z_1}{z_2} \quad (18)$$

Donde:

$z_1 = \sqrt{2}\,(\sqrt{1-\phi}\,(\phi-1+3\delta)(\phi-1+\delta)\sqrt{1-\phi-4\delta}$
$+(\phi-1+2\delta)(\delta^2+4(\phi-1)\delta+(\phi-1)^2))^{1/2}$

$z_2 = 2(\sqrt{1-\phi}\,(1-\phi-\delta)\sqrt{1-\phi-4\delta}$
$+(1-\phi)(\phi-1+3\delta))^{1/2}$

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se analizó la influencia de dispositivos TID para el control de vibraciones por desbalance en un modelo rotodinámico masa-resorte-amortiguador equivalente que considera efectos giroscópicos. Al aplicar el método de optimización de puntos invariantes se generaron soluciones cerradas para los parámetros óptimos del TID; las ecuaciones obtenidas son funciones de los parámetros adimensionales δ y ϕ. En la

ISSN: 2992-8338

Figura 7 se presentan las gráficas de las funciones optimizadas de los tres TID analizados.

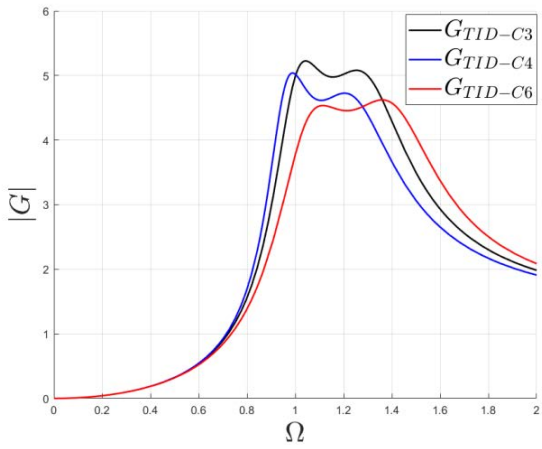


Figura 7. Contraposición de gráficas de respuesta del sistema incorporando los dispositivos TID, para el modelo rotodinámico de la Figura 1 con parámetros $\phi = 0.2043$ y $\delta = 0.1$.

Es evidente que el uso de estos dispositivos genera un control en la amplitud de vibración en la zona de resonancia. Se observa una notable diferencia en las amplitudes de vibración que se logran con cada red, siendo la red C3 la que mantiene una mayor amplitud de vibración y la red C6 la que consigue la menor amplitud. En la Figura 8 se presenta el comportamiento del sistema con el TID C3 al variar el parámetro adimensional δ. Se observa que al aumentar el valor de δ la amplitud de vibración disminuye, lo que coincide con investigaciones reportadas.

La misma tendencia del comportamiento del sistema

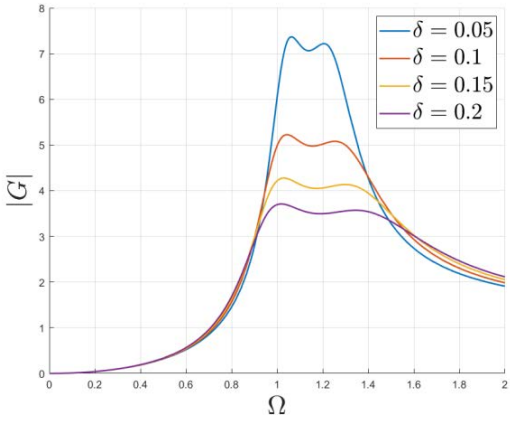


Figura 8. Comportamiento del sistema con el TID C3, al variar δ. para el modelo rotodinámico de la Figura 1 con parámetros $\phi = 0.2043$ y $\delta = 0.1$.

rotodinámico con el TID C3, que se muestra en la Figura 8, se presenta incorporando los TID con las redes mecánicas C4 y C6. En la Tabla 2 se presenta una comparación entre los TID analizados. Tomando como referencia la respuesta del TID C3, se analiza el porcentaje de reducción de la amplitud máxima de vibración obtenida por las redes C4 y C6, para un valor del parámetro adimensional $\phi = 0.2043$.

Tabla 2. Comparación de la amplitud máxima de respuesta, incorporando los TID, para el modelo rotodinámico de la Figura 1 con parámetro $\phi = 0.2043$.

	Amplitud máxima de respuesta adimensional (porcentaje de reducción)		
δ	*TID C3*	TID C4	TID C6
0.05	7.3659	7.2646 (1.37%)	6.968 (5.4%)
0.1	5.2255	5.0384 (3.58%)	4.6225 (11.54%)
0.15	4.276	4.0296 (5.76%)	3.4385 (19.59%)
0.198	3.9623	3.6919 (7.78%)	2.9563 (36.48%)

Con base en la Tabla 2, se observa que para $\phi = 0.2043$ y en el intervalo $0.05 \leq \delta \leq 0.198$, el sistema rotodinámico con el TID C3 presenta la mayor amplitud de vibración en comparación con el rotor incorporando los TID C4 y C6. Para el mismo intervalo de valores de δ, el sistema rotodinámico con el TID C4 presenta una amplitud máxima de vibración con una reducción de $1.37\% - 7.78\%$ en comparación con el TID C3. Por otra parte, el sistema rotodinámico con el TID C6 es el que presenta una vibración menor y un mejor comportamiento (mayor ancho de banda y una curva más plana), reduciendo la máxima amplitud de vibración desde un 5.4% para $\delta = 0.05$ hasta un 36.48% para un $\delta = 0.198$, comparado con la vibración que se genera en el rotor con el TID C3. Sin embargo, la estructura de la red C6 evaluada mediante el método de puntos invariantes produce ecuaciones de parámetros óptimos que se encuentran limitadas a funcionar en un intervalo específico de valores de δ en comparación con las redes C3 y C4. Por lo tanto, el valor máximo que puede tomar δ en la red C6, será mucho menor que el que pueden tomar las redes C3 y C4.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se analizó el comportamiento de un sistema rotodinámico utilizando TIDs para el control de vibración generada por desbalance. El modelo matemático de dos grados de libertad del sistema rotodinámico incluyendo efectos giroscópicos, se obtuvo aplicando la ecuación de Euler-Lagrange a la energía cinética y potencial del sistema. La simetría geométrica del eje y de los coeficientes del soporte en las direcciones q_1, q_2 del sistema rotodinámico permitieron simplificar el modelo de dos grados de libertad a un sistema de un solo grado de libertad. Se analizó el comportamiento dinámico del sistema rotodinámico utilizando dispositivos

ISSN: 2992-8338

mecánicos tipo TID implementando las redes mecánicas C3, C4 y C6.

De los resultados obtenidos, se observó que los dispositivos mecánicos TID reducen las vibraciones por desbalance en sistemas rotodinámicos. Conforme se incrementa el parámetro adimensional δ, la amplitud de vibración disminuye. Se obtuvieron soluciones cerradas para el cálculo de los parámetros óptimos al emplear el método de optimización de puntos invariantes. Las ecuaciones obtenidas son función de los parámetros adimensionales δ (relación de masa del inersor con respecto al sistema principal) y ϕ (relación de efectos giroscópicos).

De las redes analizadas, la C3 presenta la mayor amplitud de vibración en el rotor. Por otro lado, la red C4 genera una reducción en la amplitud de vibración máxima en comparación con la red C3; tomando como referencia los puntos invariantes, en el sistema rotodinámico con el TID C4 la respuesta vibratoria presenta un ancho de banda con una curva menos plana en la amplitud máxima de vibración. En contraste, la red mecánica C6 presentó una vibración menor en la respuesta del rotor, mostrando un ancho de banda mayor y con una curva más plana en la amplitud máxima de la vibración. Sin embargo, las ecuaciones de los parámetros óptimos de la red C6 están limitadas a funcionar en un intervalo de valores del parámetro adimensional δ, por lo que las redes mecánicas C3 y C4 pueden evaluarse para valores de δ mayores que los permitidos para la red C6.

REFERENCIAS

Campos, R.O., Nicoletti, R., 2015. Vibration reduction in vertical washing machine using a rotating dynamic absorber. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 37. https://doi.org/10.1007/s40430-014-0151-1

Den Hartog, J.P., 1947. MECHANICAL VIBRATION, 3rd Edition. ed. McGraw-Hill.

Ebrahimnejad, R., Samani, F.S., 2020. Novel inerter-based absorbers for suppressing beams vibration under successive moving loads. SN Appl Sci 2. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03566-5

Fontes, Y.C., Nicoletti, R., 2016. Rotating dynamic absorber with viscoelastic element. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 38. https://doi.org/10.1007/s40430-015-0328-2

Hu, H. ling, He, L. dong, 2017. Online control of critical speed vibrations of a single-span rotor by a rotor dynamic vibration absorber at different installation positions. Journal of Mechanical Science and Technology 31. https://doi.org/10.1007/s12206-017-0404-x

Hu, Y., Chen, M.Z.Q., 2015. Performance evaluation for inerter-based dynamic vibration absorbers. Int J Mech Sci 99. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.06.003

Hwang, J.S., Kim, J., Kim, Y.M., 2007. Rotational inertia dampers with toggle bracing for vibration control of a building structure. Eng Struct 29. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.005

Lalanne, M., Ferraris, G., 1998. Rotordynamics Prediction in Engineering, 2nd Edition. ed. John Wiley & Sons Ltd.

Marian, L., Giaralis, A., 2014. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems. Probabilistic Engineering Mechanics 38. https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2014.03.007

Mendoza-Larios, J.G., Barredo-Hernández, E., Maldonado-Bravo, I.A., 2022. Absorbedor dinámico de vibración no tradicional para controlar fuerza inercial. Cultura Científica y Tecnológica 19. https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.2.2.1

Pradono, M.H., Iemura, H., Igarashi, A., Kalantari, A., 2008. Application of angular-mass dampers to base-isolated benchmark building. Struct Control Health Monit 15. https://doi.org/10.1002/stc.270

S. Rao, S., 2012. VIBRACIONES MECÁNICAS, 5ta Edición. ed. PEARSON EDUCACIÓN.

Smith, M.C., 2002. Synthesis of mechanical networks: The inerter. IEEE Trans Automat Contr 47. https://doi.org/10.1109/TAC.2002.803532

Sun, X.Q., Chen, L., Wang, S.H., Zhang, X.L., Yang, X.F., 2016. Performance investigation of vehicle suspension system with nonlinear ball-screw inerter. International Journal of Automotive Technology 17. https://doi.org/10.1007/s12239-016-0041-x

Vance, J.M., 1988. Rotordynamics of turbomachinery, first. ed. John Wiley & Sons.

Xu, K., Bi, K., Han, Q., Li, X., Du, X., 2019. Using tuned mass damper inerter to mitigate vortex-induced vibration of long-span bridges: Analytical study. Eng Struct 182. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.067

Xu, Q., Luo, Y., Yao, H., Zhao, L., Wen, B., 2019. Eliminating the Fluid-Induced Vibration and Improving the Stability of the Rotor/Seal System Using the Inerter-Based Dynamic Vibration Absorber. Shock and Vibration 2019. https://doi.org/10.1155/2019/1746563

Xu, Q., Niu, J., Yao, H., Zhao, L., Wen, B., 2018. Fluid-Induced Vibration Elimination of a Rotor/Seal System with the Dynamic Vibration Absorber. Shock and Vibration 2018. https://doi.org/10.1155/2018/1738941

Yao, H., Chen, Z., Wen, B., 2016. Dynamic Vibration Absorber with Negative Stiffness for Rotor System. Shock and Vibration 2016. https://doi.org/10.1155/2016/5231704

Yao, H., Wang, T., Wen, B., Qiu, B., 2018. A tunable dynamic vibration absorber for unbalanced rotor system. Journal of Mechanical Science and Technology 32. https://doi.org/10.1007/s12206-018-0305-7

ISSN: 2992-8338

Design and numerical analysis of space frame chassis for a formula student race car.

A. García*, J. Lome*, A. Salgado*, E. Rosado-Tamariz*, **

**Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Ingeniería Mecatrónica.*
(A01424851@tec.mx, A01423685@tec.mx, A01424900@tec.mx, erik.rosado@tec.mx).

***Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México.*
(erik.rt@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The present research aims to design and numerically analyze the behavior of the chassis for a single-seat student formula racing vehicle using computer-aided design and simulation tools, which must satisfy the requirements established in the formula SAE rules. The design and geometric modeling of the chassis were carried out using the SolidWorks CAD software, in the same way, the structural behavior of the chassis under static operating loads was evaluated using the SolidWorks finite element simulation module. For the chassis proposed design, four load conditions were considered, which are vertical bending strength, frontal impact, side impact, and longitudinal torsion. Based on the numerical results for the four evaluated operational conditions, it is concluded that the proposed chassis design is a safe one for the driver.

Keywords: Chassis, Formula SAE, Modeling, Simulation, Finite Element Analysis, Race Car.

1. INTRODUCCIÓN

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés) organiza una competencia universitaria internacional enfocada al diseño, construcción, ensamblaje y desempeño de vehículos de carreras monoplaza estudiantiles llamada Fórmula SAE, 2024, la cual reúne a estudiantes de todo el mundo. En este tipo de eventos de carreras, al fabricar un vehículo, existen algunas reglas y restricciones que deben seguirse estrictamente para evitar discrepancias financieras y conflictos entre los equipos participantes [Formula SAE Rules, 2024, Wongchai, 2020]. En los vehículos de carreras monoplaza como los desarrollados para las competencias fórmula SAE, el chasis es un elemento fundamental, ya que es el encargado de soportar las cargas y garantizar la seguridad del piloto. Existen diferentes tipos de chasis, pero el más utilizado en los vehículos para las competencias fórmula SAE es el chasis de bastidor espacial, ya que es fácil de fabricar y tiene una buena rigidez estructural [Mohammed et al. ,2018]. Este tipo de chasis es ligero y resistente, y se puede fabricar con una amplia variedad de materiales, como el aluminio, acero, titanio o fibra de carbono, por supuesto, siguiendo las restricciones del reglamento de cada competencia.

El diseño del chasis debe tener en cuenta una serie de factores, como las dimensiones del vehículo, la ubicación de los componentes y las cargas que soportará. Uno de los principales retos es encontrar el equilibrio adecuado entre la resistencia y su masa, ya que un chasis demasiado rígido puede ser incómodo para el piloto, mientras que uno demasiado ligero puede ser propenso a la deformación. Otro reto es la distribución de las cargas, ya que el chasis debe soportar el peso del vehículo, el piloto y los componentes mecánicos, por ello la distribución de estas cargas debe ser uniforme para evitar que el chasis se deforme. La resistencia estructural de cualquier chasis puede mejorarse a través de modificaciones geométricas [Dere et al., 2021]. Uno de los parámetros clave para tener en cuenta al diseñar el chasis es la relación potencia-masa.

Los avances tecnológicos han permitido a los estudiantes diseñar y construir chasises más eficientes y seguros. Las herramientas de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) permiten generar diseños detallados del chasis, mientras que las técnicas de simulación como el análisis por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés) permiten evaluar la resistencia del chasis sujeto a cargas operacionales y de diseño, antes que se proceda con su manufactura.

Esta investigación se enfoca a la evaluación estructural estática del chasis de un vehículo fórmula SAE estudiantil bajo las condiciones de carga de resistencia a la flexión vertical, impacto frontal, impacto lateral y torsión longitudinal. Para ello, se realizaron simulaciones numéricas basadas en el método de elementos finitos mediante el modulo de simulación del software SolidWorks.

2. PROCESO DE DISEÑO

El proceso de diseño considera cuatro variables principales para su desarrollo:

- Materiales para su manufactura.
- Requerimientos operativos basados en las reglas de la fórmula SAE.
- Geometría del diseño propuesto.
- Cargas a las que está sometido.

ISSN: 2992-8338

2.1 Selección de materiales

La selección del material adecuado es una tarea importante y desafiante en el proceso de diseño para mantener una buena relación resistencia-masa del diseño propuesto del chasis. La comparación de las propiedades de los materiales que son fácilmente accesibles y de calidad se muestra en la Tabla 1. Para el presente trabajo, se ha seleccionado el acero AISI 4130 normalizado a 870 °C debido a su fácil accesibilidad y calidad predominante en comparación con otros materiales asequibles.

Tabla 1. Materiales y sus propiedades.

Material	Esfuerzo de Cedencia (MPa)	Esfuerzo Último (MPa)	Coeficiente de Poisson's
AISI 1018	370	440	0.28
AISI 1020	350	400	0.29
AISI 4130	560	560	0.29

2.2 Requerimientos operativos basados en las reglas de la fórmula SAE.

El reglamento de la fórmula SAE establece diferentes requerimientos de diseño de acuerdo con el tipo de categoría de la competencia. Las dimensiones principales de la configuración del diseño propuesto del chasis que cumplen con los requerimientos establecidos por la Formula SAE Rules, 2024, se enlistan a continuación:

- Distancia entre ejes: 1,450 mm
- Ancho de la vía delantera: 1,200 mm.
- Ancho de vía trasera: 1,180 mm.
- Distancia al suelo: 150 mm
- Altura del arco principal: 1,115 mm.
- Altura del arco frontal: 515 mm.
- Inclinación del arco delantero: 2 grados.
- Inclinación del arco principal: 6 grados.

De la misma manera, la Formula SAE Rules, 2024, establece las características dimensionales de los elementos estructurales permitidos. En la Tabla 2, se enlistan los elementos estructurales empleados en cada componente del diseño del chasis propuesto:

Tabla 2. Dimensiones de los tubos de acero empleados en el diseño propuesto del chasís.

Componente	Diámetro Exterior (mm)	Espesor (mm)
Tirantes Frontales Soportes del Plano Frontal	25.4	1.2
Plano Frontal Protectores Laterales Tirantes del Arco Principal	25.4	1.6
Arco Frontal Arco Principal	25.4	2.4

2.2 Geometría del diseño propuesto.

El chasis se diseña de acuerdo con los requerimientos establecidos en el reglamento vigente de cada competencia con un enfoque de seguridad para el piloto, y por supuesto que sea resistente para todas las pruebas evaluadas en la competencia. El diseño propuesto del chasis está basado en algunas características estructurales de los modelos propuestos por Agarwal et al., 2020, Álvarez, 2018 y More et al., 2017. En la Figura 1, se muestra la vista isométrica del modelo geométrico CAD 3D del chasis propuesto y se ilustran gráficamente los principales componentes del chasis de un vehículo de carreras fórmula estudiantil.

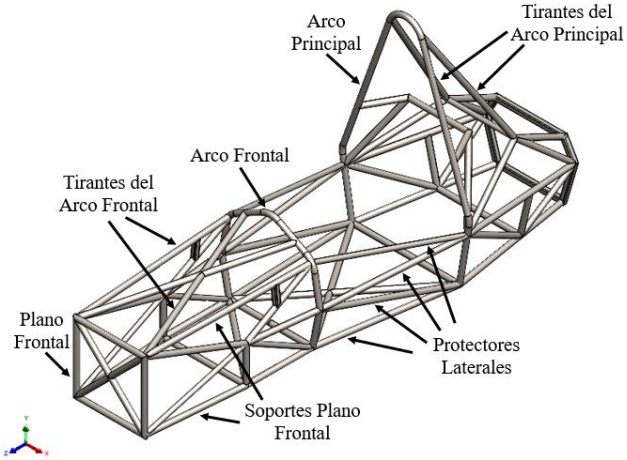


Figura 1. Vista isométrica del modelo geométrico CAD 3D del chasis propuesto y sus elementos principales, elaborado en SolidWorks.

2.4 Cargas operativas

El chasis es un componente estructural que puede soportar todos los sistemas funcionales del vehículo. Este componente puede ser una única estructura soldada, múltiples estructuras soldadas o una combinación de estructuras compuestas y soldadas [SAE Rules, 2024]. En el presente trabajo se analizan cuatro casos de carga estática con el fin de validar la resistencia del chasis y que este es apto para competir en la fórmula SAE. Estos análisis son las pruebas de resistencia a la flexión vertical, impacto lateral, impacto frontal y torsión longitudinal.

2.4.1 Resistencia a la flexión vertical

La resistencia a la flexión vertical es una condición que evalúa la capacidad del chasis frente al peso de otros componentes del vehículo, como el motor, la carrocería, los alerones, la transmisión y el piloto, bajo el efecto gravitacional. La flexión vertical empleando el peso del vehículo se utiliza para determinar si el bastidor es lo suficientemente fuerte como para sostener el peso total del vehículo. La resistencia a la flexión vertical se puede determinar aplicando la fuerza estática debida a la masa de los componentes del vehículo.

Para este caso de estudio, la condición frontera del automóvil es la restricción de movimiento en las cuatro ruedas mediante un soporte fijo, como se muestra en la Figura 2. El chasis actúa como una viga doblemente apoyada, las cuatro ruedas como soportes fijos y el peso de los demás componentes montados en el chasis como cargas verticales. La masa de los otros componentes del automóvil afectados por la fuerza de gravedad se convierte en la fuerza que empuja el chasis verticalmente como se muestra en la Figura 3.

ISSN: 2992-8338

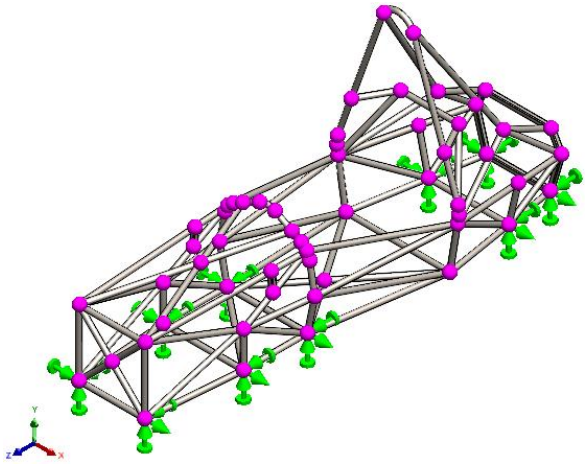


Figura 2. Condición de frontera de soporte fijo para el caso de estudio de resistencia a la flexión vertical.

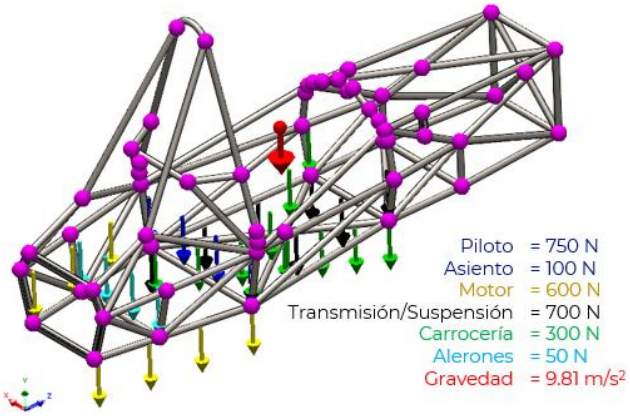


Figura 3. Cargas para el caso de estudio de resistencia a la flexión vertical.

2.4.2 Impacto frontal

Cuando se evalúa el comportamiento del vehículo mediante análisis estáticos; para determinar la carga de impacto frontal se considera que el vehículo está en estado de reposo, que la parte trasera del vehículo está en contacto con una pared rígida y en ese instante de tiempo otro vehículo lo impacta frontalmente a una velocidad establecida y por un tiempo determinado.

En este sentido, la condición frontera del automóvil es la restricción de movimiento en la parte trasera del vehículo mediante un soporte fijo, como se muestra en la Figura 4. Mientras que, la carga por impacto frontal se determina a partir de la Segunda Ley de Newton.

$$F = m * a \quad (1)$$

$$a = \Delta v/\Delta t \quad (2)$$

$$m = 255 \text{ kg} \quad v_i = 80\frac{km}{h} \quad v_f = 0\ m/s$$

Tiempo de impacto $\Delta t = 0.9\ s$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 24.69\frac{m}{s^2}$$

$$\text{F} = 6{,}295.95 \text{ N} \sim 6{,}300 \text{ N}$$

La prueba de impacto frontal se realiza aplicando una carga distribuida de 6,300 N en los cuatro nodos delanteros del plano frontal del chasis, como se muestra en la Figura 5.

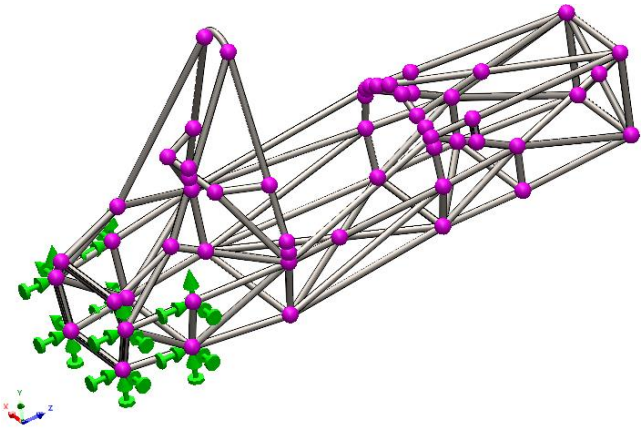


Figura 4. Condición de frontera de soporte fijo para el caso de estudio de impacto frontal.

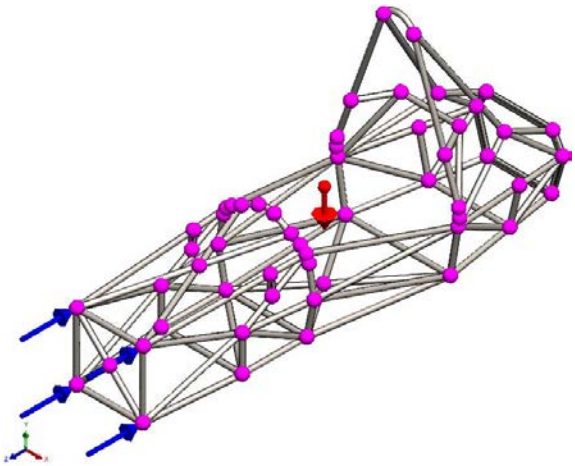


Figura 5. Cargas para el caso de estudio de impacto frontal.

2.4.3 Impacto lateral

Para determinar la carga debida al impacto lateral, se considera igualmente que el vehículo está en estado de reposo, que la parte trasera del vehículo está en contacto con una pared rígida y en ese instante de tiempo otro vehículo lo impacta ahora lateralmente a una velocidad establecida y por un tiempo determinado.

De similar manera al caso de estudio de impacto frontal, la restricción de movimiento se establece en la parte trasera del vehículo mediante un soporte fijo, como se muestra en la Figura 6. Mientras que, la carga por impacto lateral se determina aplicando la Segunda Ley de Newton, mediante las ecuaciones 1 y 2.

$$m = 255 \text{ kg} \quad v_i = 50\frac{km}{h} \quad v_f = 0\ m/s$$

Tiempo de impacto $\Delta t = 1.2\ s$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 11.57\frac{m}{s^2}$$

ISSN: 2992-8338

$$F = 2{,}950.35\ N \sim 2{,}950\ N$$

La prueba de impacto frontal se realiza aplicando una carga distribuida de 2,950 N en los soportes del plano frontal del chasis, como se muestra en la Figura 7.

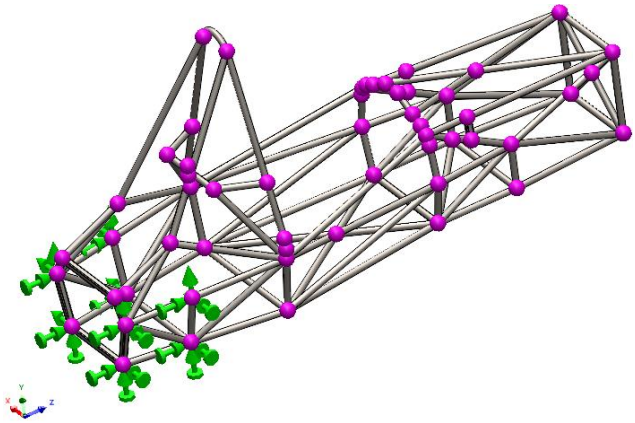


Figura 6. Condición de frontera de soporte fijo para el caso de estudio de impacto lateral.

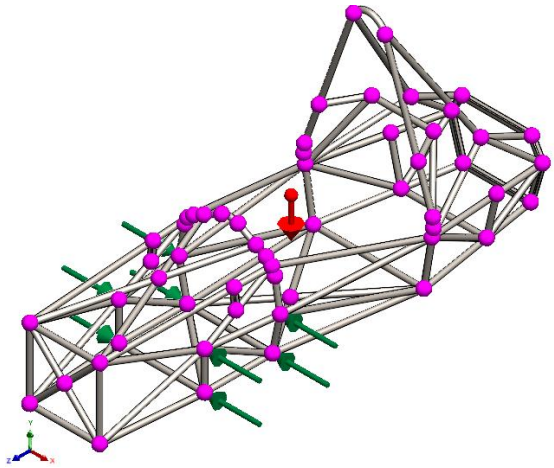


Figura 7. Cargas para el caso de estudio de impacto lateral.

2.4.4 Torsión longitudinal

Para el caso de estudio de torsión longitudinal, se supone que el neumático delantero del vehículo se voltea debido a un golpe y se considera la condición crítica de una carga dinámica del chasis delantero. Si la rigidez torsional del chasis es inadecuada, el chasis afectará el rendimiento de la suspensión. La rigidez torsional se puede determinar mediante una prueba experimental de torsión estática con condición de torsión longitudinal.

La condición límite es la masa total del automóvil dividida en las dos ruedas delanteras y convirtiéndola en fuerza, la que será la fuerza que empuja a los neumáticos delanteros verticalmente en una dirección diferente de cada lado del vehículo. Esas fuerzas crean una carga de torsión en el chasis. Por lo tanto, la carga de torsión longitudinal será de 1,300 N en cada una de las dos ruedas delanteras del vehículo, como se muestra en la Figura 8. Mientras que la condición de frontera se establece colocando los soportes fijos en los neumáticos traseros, como se ilustra en la Figura 9.

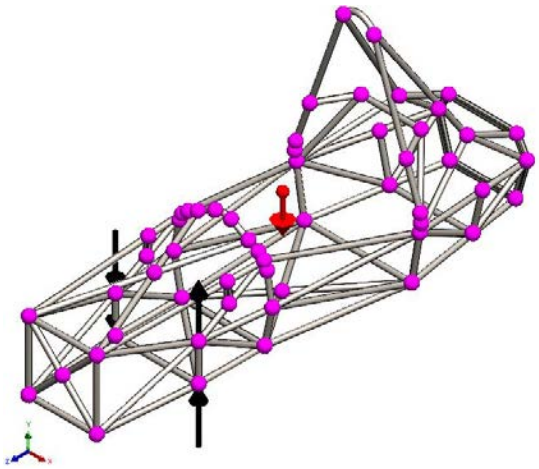


Figura 8. Cargas para el caso de estudio de torsión longitudinal.

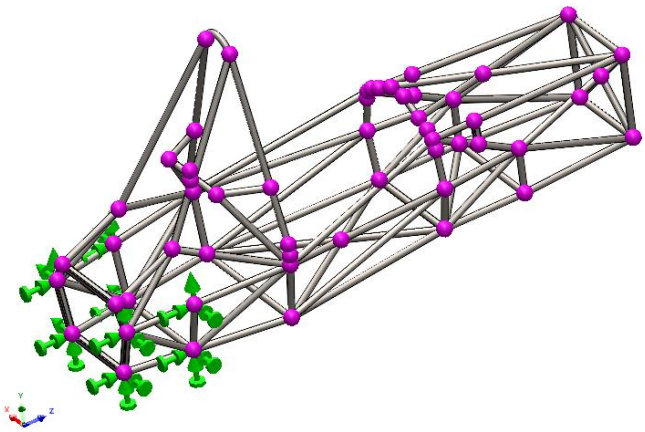


Figura 9. Condición de frontera de soporte fijo para el caso de estudio de torsión longitudinal.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El número y el tamaño de los elementos, así como las cargas y las condiciones de frontera, son todos importantes para obtener valores exactos de resistencia del chasis. Se parte del supuesto de que las conexiones no ofrecen una resistencia sustancial a la flexión o torsión [Lučić, (2023)], por lo cual, el chasis se modela como un elemento continuo. Los elementos del chasis son elementos estructurales con secciones transversales tubulares soldadas, los cuales se modelan utilizando elementos finitos tipo viga que tienen rigidez a la flexión y torsión [Hazimi et al., 2018]. Se realizaron cuatro tipos de análisis estáticos al chasis empleando el módulo de simulación de elementos finitos de SolidWorks.

En las Figuras 10 a la 13, se muestran las distribuciones de esfuerzos de von Mises en el chasis para los casos de estudios de flexión vertical, impacto frontal, impacto lateral y torsión longitudinal, respectivamente. Mientras que, en las Figuras 14 a la 17 se muestra el comportamiento de los perfiles de deformación para los cuatro casos de estudio evaluados.

ISSN: 2992-8338

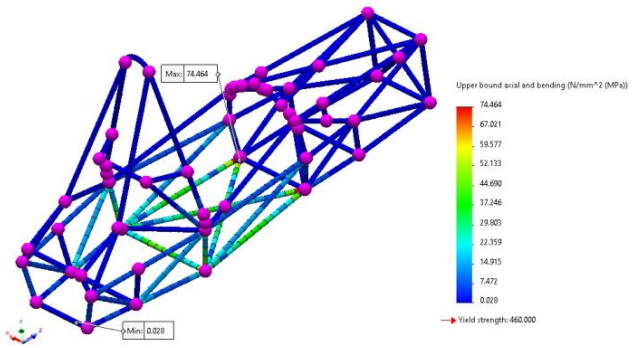


Figura 10. Distribuciones de esfuerzos de von Mises en el chasis para el caso de estudio de resistencia a la flexión vertical.

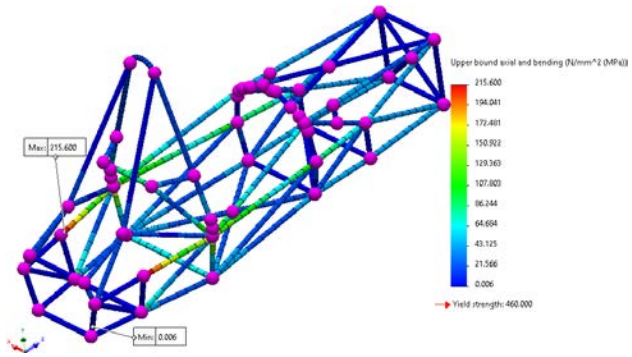


Figura 11. Distribuciones de esfuerzos de von Mises en el chasis para el caso de estudio de impacto frontal.

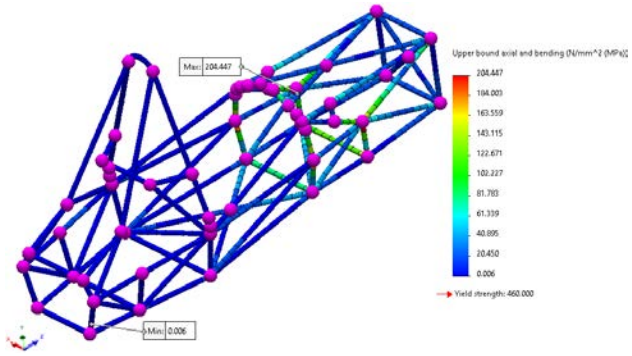


Figura 12. Distribuciones de esfuerzos de von Mises en el chasis para el caso de estudio de impacto lateral.

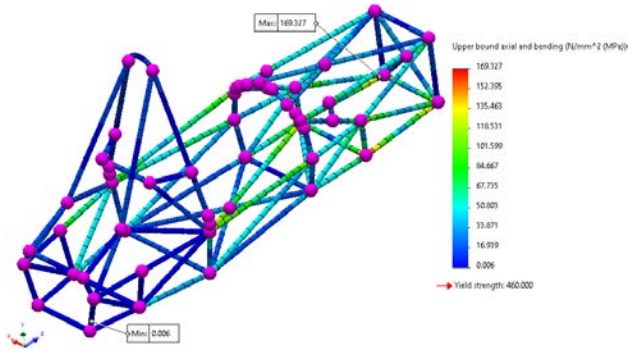


Figura 13. Distribuciones de esfuerzos de von Mises en el chasis para el caso de estudio de torsión longitudinal.

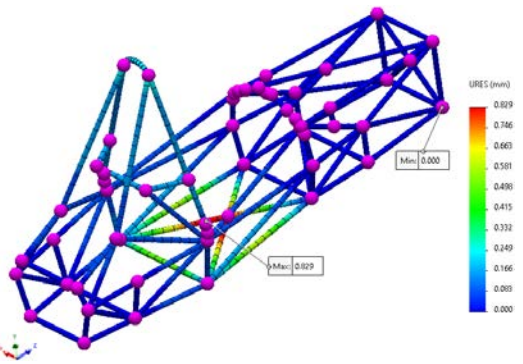


Figura 14. Distribuciones de deformaciones en el chasis para el caso de estudio de resistencia a la flexión vertical.

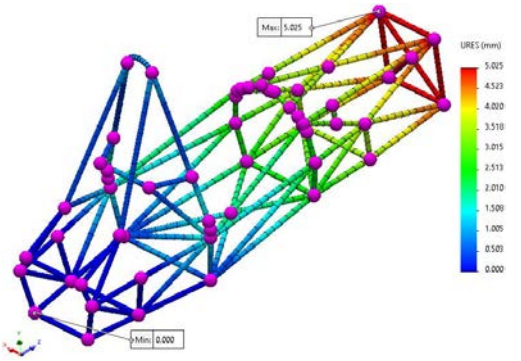


Figura 15. Distribuciones de deformaciones en el chasis para el caso de estudio de impacto frontal.

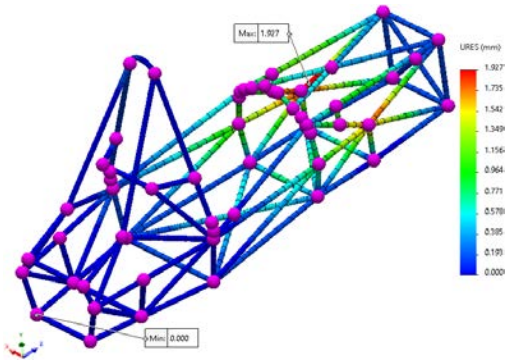


Figura 16. Distribuciones de deformaciones en el chasis para el caso de estudio de impacto lateral.

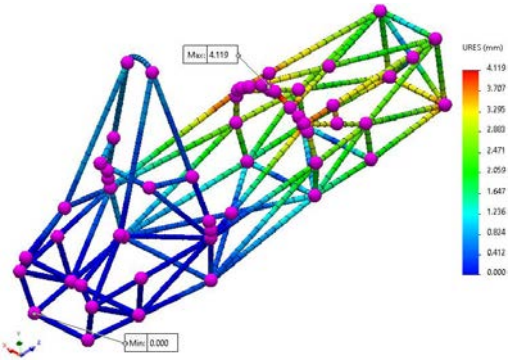


Figura 17. Distribuciones de deformaciones en el chasis para el caso de estudio de torsión longitudinal.

ISSN: 2992-8338

Finalmente, los factores de seguridad mínimos para los cuatro casos de estudio de determinan empleando la teoría de falla por carga estática de energía de distorsión o de von Mises y se muestran en la Figura 18.

$$N = \frac{\sigma_{yp}}{\sigma'} \quad (3)$$

Donde:

N, es el factor de seguridad.
σ_{yp}, es el esfuerzo de cedencia del material.
σ', es el esfuerzo de máximo de von Mises.

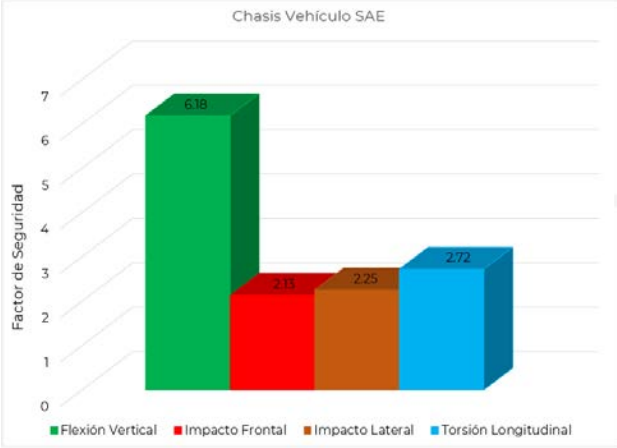


Figura 18. Factores de seguridad mínimos en el chasis para los casos de estudios evaluados.

Con base en los resultados obtenidos se puede observar lo siguiente:

- El máximo esfuerzo de von Mises para el chasis, se presenta en el caso de estudio de impacto frontal y tiene una magnitud de 215.6 MPa, cuyo valor es 2.17 veces menor que el esfuerzo de cedencia del material propuesto.
- Las deformaciones máximas en el chasis se presentan para los casos de estudio de impacto frontal y torsión longitudinal con valores de 5.025 y 4.119 mm, respectivamente. Estas deformaciones representan una quinta parte de la deformación máxima permitida de 25 mm por el reglamento vigente de la fórmula SAE.
- El factor de seguridad mínimo del chasis es de 2.13 para el caso de estudio crítico de impacto frontal.

6. CONCLUSIONES

En el diseño del chasis propuesto se enfoca en tres principales factores que fueron la masa, la trayectoria de las cargas y las propiedades mecánicas del material, por lo cual se planteó usar un número mínimo de tubos que cumpliera con los factores de diseño y la reglamentación requerida, con la finalidad de obtener un diseño final seguro, simple y liviano.

De acuerdo con los resultados obtenidos y los requerimientos de la reglamentación de la competencia fórmula SAE, se observa que el diseño del chasis propuesto y el material seleccionado resultan seguros y aptos para competir de acuerdo con las características mecánicas mínimas permitidas por el reglamento.

Los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad para todos los casos de carga cumplen con los criterios de diseño y la reglamentación de la fórmula SAE. Para complementar la evaluación presentada, se deberá considerar el efecto dinámico de las cargas sobre el chasis. Como trabajo futuro se recomienda incluir el dispositivo atenuador impacto del vehículo con la finalidad de evaluar su comportamiento y verificar si este elemento permite disminuir los niveles de esfuerzos y deformaciones para el caso de estudios crítico del chasis (impacto frontal). En conclusión, el diseño propuesto del chasis bajo un escenario de cargas estáticas resulta seguro y adecuado para el piloto de la competencia fórmula SAE.

REFERENCES

Agarwal, S., Awasthi, P., Saatyaki, T., Kushwaha, M., & Jaiswal, V. (2020). Design Analysis of Spaceframe Chassis for FSAE Vehicle. Int. J. Eng. Res. Technol, 9, 559-561.

Álvarez Salazar, V. R. (2018). Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehículo de competencia Formula SAE eléctrico (Bachelor's thesis).

Dere, A. A., Singh, M., Thakan, A., Kumar, R., & Singh, H. (2021). Design optimization of go-kart chassis frame using modal analysis. In Advances in Metrology and Measurement of Engineering Surfaces: Select Proceedings of ICFMMP 2019 (pp. 171-186). Springer Singapore.

Hazimi, H., Ubaidillah, U., Setiyawan, A. E. P., Ramdhani, H. C., Saputra, M. Z., & Imaduddin, F. (2018, February). Vertical bending strength and torsional rigidity analysis of formula student car chassis. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1931, No. 1). AIP Publishing.

Lučić, M. (2023). Structural analysis of Formula Student vehicle chassis using Ansys software. Industry 4.0, 8(2), 52-56.

Mohammed, N. A., Nandu, N. C., Krishnan, A., Nair, A. R., & Sreedharan, P. (2018). Design, analysis, fabrication and testing of a formula car chassis. Materials Today: Proceedings, 5(11), 24944-24953.

More, A., Chavan, C., Patil, N., & Ravi, K. (2017). Design, analysis and optimization of space frame chassis. International Journal of Engineering and Technology, 9(2), 1411-1422.

Rao, P. K. V., Putsala, K. S. K., Muthupandi, M., & Mojeswararao, D. (2022). Numerical analysis on space frame chassis of a formula student race car. Materials Today: Proceedings, 66, 754-759.

SAE-International (2024) Formula SAE Rules 2024, 2.1. Society of Automotive Engineers International, USA.

Society of Automotive Engineers Formula SAE 2024. https://www.sae.org/attend/student-events/formula-sae-michigan.

Wongchai, B. (2020). Front and Side Impact Analysis of Space Frame Chassis of Formula Car. GEOMATE Journal, 18(67), 168-174.

ISSN: 2992-8338

Review: Entropy in fiber-reinforced polymeric composite materials.

Oscar Fernando Oliveros Riego*, Arturo Abúndez Pliego*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, CP 62490 Mx (e-mail: d18ce029@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: Abstract: In this paper, a review was carried out of the research that presents the implementation of the second law of thermodynamics (entropy), to estimate the behavior of materials subjected to cyclic loads, using the principle of entropy generation as a parameter for the estimation of damage accumulation in composite materials. This method, supported by the first and second laws of thermodynamics, proves to have an acceptable damage estimation percentage. The study of the dissipated energy of a system means having results comparable to those obtained in the emission of acoustic waves and damage estimation models based on the degradation of the elastic properties of the material.

Keywords: Thermodynamics, composite materials, damage, fatigue life, entropy.

1. INTRODUCCION

El uso de materiales compuestos ha aumentado sustancialmente en los últimos años debido a su baja densidad y resistencia, entre algunas de sus características contrastadas con las de los materiales convencionales como los metales, por ejemplo. Sin embargo, los compuestos no son inmunes a la falla por fatiga, y su compleja naturaleza anisotrópica hace que la caracterización de su comportamiento sea sustancialmente más difícil en contraste con materiales convencionales, como el metal (Alcudia, 2016).

Se han realizado diversas investigaciones para lograr describir con mayor exactitud la evolución de la degradación de los materiales compuestos al ser sometidos a fatiga, dicha degradación corresponde a la tasa de acumulación del daño en el material. La importancia de los modelos para la estimación del daño acumulativo en materiales compuestos aumenta respecto a la demanda de este tipo de materiales dentro del sector industrial (Oliveros, 2020).

Algunos de los estudios realizados para estudiar el comportamiento de las propiedades de los materiales compuestos al ser sometidos a cargas por fatiga, son los métodos basados en las primeras dos leyes de la termodinámica, específicamente en el principio de la generación de entropía. Se han desarrollado diversos estudios (Naderi, Amiri, & Khonsari, 2010; Kahirdeh, 2014; Mahmoudi & Mohammadi, 2019; Mohammadi & Mahmoudi, 2018), que, con base en la estimación de entropía, se ha observado cómo se desarrolla el daño en el material.

En este trabajo se hace mención de los trabajos que consideran el principio de entropía para la estimación del comportamiento en materiales compuestos, así como de la importancia que presenta debido al alto porcentaje de fiabilidad que presenta y a la teorización como base a partir de los principios de la termodinámica.

2. FATIGA DE MATERIALES COMPUESTOS

La falla por fatiga es el fenómeno que se presenta en los componentes mecánicos que experimentan cargas cíclicas. Dicho fenómeno se presenta cuando los elementos son sometidos a cargas repetitivas o cíclicas, un material puede fallar incluso si la carga está por debajo del límite elástico del mismo (Talreja, 1987). El principal problema con la fatiga, es la falla debido a la fatiga del material, la cual puede ocurrir de manera repentina

La fatiga en los metales se inicia mediante microfisuras que crecen debido a las cargas cíclicas. Las microfisuras se propagan y se unen hasta alcanzar un tamaño crítico. En esta etapa, la tasa de propagación crece rápidamente y la fractura final ocurre poco después. En los compuestos, los mecanismos de falla no se limitan a la evolución de una o varias grietas. De hecho, pueden ocurrir diferentes tipos de daños, incluyendo el agrietamiento de la matriz, rotura de fibras, el desprendimiento de la fibra y matriz (debonding), pandeo de fibras y delaminación (Talreja & Chandra, 2012).

El desarrollo de los mecanismos de falla en el material compuesto depende tanto de las propiedades de los materiales constituyentes y configuración estructural (configuración del laminado) como de las características de la carga aplicada. En la figura 1 se observan los principales mecanismos de falla que se llevan a cabo a lo largo de la vida de los materiales compuestos sometidos a cargas cíclicas (Reifsneider, Case, & Duthoit, 2000).

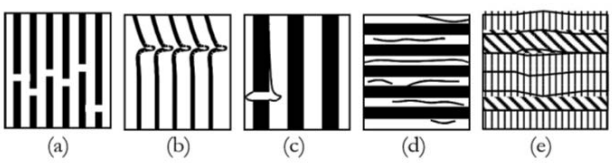


Figura 1. Mecanismos de falla en compuestos, a) rotura de

ISSN: 2992-8338

Las observaciones experimentales en diferentes investigaciones, como las presentadas en este trabajo, presentan conjuntos de parámetros que gobiernan el comportamiento a fatiga de los compuestos. Estos parámetros se clasifican en internos y externos. Los parámetros internos incluyen: Tipo de Fibras (Carbono, Vidrio, ...), Tipo de Resina (Termoestable, Termoplástica), Configuración de disposición (simétrica, asimétrica, ...), Tipo de Refuerzo (Unidireccional, Tejido, …), Curado, Tamaño de las fibras. Los parámetros externos incluyen: Condición de carga (tensión, presión, corte, carga mixta, multiaxial, relación de tensiones, frecuencia...), Parámetro Ambiental (Temperatura, Humedad, ...). Un ejemplo, es que en los materiales compuestos la orientación de las fibras del refuerzo juega un papel importante, ya que las propiedades mecánicas dependerán del ángulo formado entre la dirección de aplicación de la carga y la dirección de la fibra como se muestra en la figura 2 (Jones, 1999).

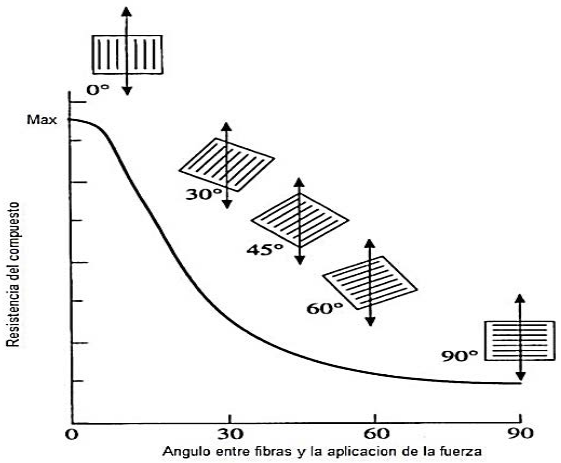


Figura 2. Efecto de la orientación de las fibras sobre la resistencia a la tensión del compuesto.

Es posible estimar la vida del material y su comportamiento con base en el estudio del daño. El daño puede entenderse intuitivamente por imperfección, defecto o falla que perjudica las condiciones funcionales y de trabajo en los materiales (Stepinski, Uhi, & Staszewski, 2013). Los materiales compuestos se pueden modelar como sistemas con excitaciones de entrada y señales medibles de salida. En este contexto, el daño puede considerarse como una excitación adicional que resulta en el flujo de energía y la transformación, lo que ocasiona modificaciones de las señales de salida. Por lo tanto, la detección de daños es un problema inverso. El daño también puede considerarse como una modificación de las propiedades del material y/o parámetros estructurales (Stepinski, Uhi, & Staszewski, 2013).

Wei, Johnson, & Haj-Ali (2010), utilizaron imágenes ultrasónicas en compuestos laminados para estimar la progresión del daño retomando el principio de Broutman & Sahu (1971). Mayer *et al* (1993), realizaron un análisis en el cual determinaron los mayores mecanismos de daño en materiales compuestos laminados en función de su vida de servicio. Rodriguez (2013), Djabalia, Toubalb, Zitounec, & Rechaka (2017) y Christian, DiazDelaO, & Patterson (2017), observaron y caracterizaron con pruebas mecánicas el comportamiento del material bajo cargas cíclicas a diferentes porcentajes de esfuerzo; determinaron que las evaluaciones basadas en la deformación de estructuras compuestas dañadas pueden conducir a predicciones de propiedades remanentes más precisas que las realizadas utilizando técnicas de inspección tradicionales.

Carraro, Maragoni, & Quaresimin (2017), desarrollaron un método para la predicción de la evolución de la densidad de fisuras en laminados simétricos multidireccionales sometidos a cargas cíclicas, el cual validaron con datos experimentales. Así también existen investigaciones basadas en modelos de estimación de daño desarrollados por otros autores que permiten una perspectiva diferente al analizar y verificar su factibilidad en la estimación de daño en compuestos laminados (Marino, Luca, & Ramesh, 2009; Giancane, Panella, & Dattoma, 2009; Cairnsa, Nelsonb, Wooc, & Millera, 2016).

Un método comúnmente empleado para medir el daño consiste en aprovechar la relación entre el daño y el módulo de elasticidad longitudinal del material, y de esta manera evaluar el daño por métodos inversos. En la Ecuación 1 se representa el daño de un material en función de la variación del módulo de elasticidad longitudinal del mismo.

$$D = 1 - \frac{E}{\tilde{E}} \qquad (1)$$

Donde E es el módulo de elasticidad inicial sin daño y $\tilde{E}$ es el módulo de elasticidad con daño después de n ciclos. Por lo que el daño se expresa como la degradación del módulo de elasticidad del material (Lemaitre & Desmorat, 2005).

3. PRINCIPIO DE ENERGIA PARA LA ESTIMACION DE ENTROPIA EN COMPUESTOS

La degradación permanente como el daño y la plasticidad son procesos irreversibles que son de naturaleza disipativa y posteriormente generan entropía, según la segunda ley de la termodinámica. Por tanto, la entropía puede servir como una medida natural de la degradación (Basaran y Yan, 1998).

Giancane, Panella, & Dattoma (2009), desarrollaron un análisis experimental con diferentes configuraciones de laminados sometidos a fatiga de amplitud constante, monitorearon dos parámetros en la evolución de daño: degradación de las propiedades elásticas y disipación de energía. Observaron que, al comparar el daño en función de estos parámetros entre sí, el porcentaje de estimación resulta no ser tan diferente, por lo que el principio de disipación de energía se puede utilizar para estimar la evolución del daño en materiales compuestos laminados.

M. Naderi (2012), caracterizó la acumulación de daño en función de la energía disipada utilizando la técnica de termografía infrarroja en un compuesto de vidrio/epoxi sometido a pruebas de flexión con cargas cíclicas de amplitud constante. El método compara la evolución del daño en función de la disipación de energía con un estudio de emisión acústica para detección de la evolución del daño. Se utilizó la

ISSN: 2992-8338

definición de daño en función de la disipación de energía propuesta por Giancane, Panella, & Dattoma (2009).

Uno de los modelos desarrollados en principio, y que se basan en la aplicación de los principios termodinámicos, es el modelo de entropía de fatiga por fractura (FFE), desarrollado por primera vez por Naderi, Amiri, & Khonsari (2010), para la degradación de metales por fatiga de ciclo bajo y extendida a fatiga de ciclo alto por Liakat & Khonsari (2016). En este modelo se estima la acumulación de generación de entropía hasta el fallo final y es considerada como una propiedad del material. La implementación del modelo y concepto aplicado para monitorear el estado del material se ha demostrado para metales y se ha extendido para la aplicación en compuestos (Darehbidi y Khonsari, 2008; Khonsari y Naderi, 2011; Naderi y Khonsari, 2012).

El enfoque de FFE ofrece un criterio de falla por fatiga. La aplicación de este método se facilita mediante cámaras infrarrojas (IR), una tecnología que está encontrando un uso generalizado en la investigación de la fatiga. Utilizar el enfoque FFE requiere formular la primera y segunda leyes de la termodinámica. Los detalles generales de las formulaciones están disponibles en el libro clásico de Lemaitre y Chaboche, (1994).

Según la ley de conservación de la energía (la primera ley de la termodinámica), la tasa de cambio de la energía interna dentro de un volumen controlado es igual a la tasa de flujo de energía hacia o desde dicho volumen (Pokrovski, 2005):

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \qquad (2)$$

Donde E es la energía total relacionada a un volumen y t es el tiempo, Q y W representan el flujo de calor y el trabajo efectuado respectivamente.

La segunda ley de la termodinámica explica los fenómenos de naturaleza irreversible y de degradación, lo cual se deriva en otra propiedad llamada entropía, la cual dicta la dirección de un proceso, cuantificando la energía disipada como calor que no se puede convertir en trabajo útil. La entropía se expresa como una variación de la energía con respecto a una variación de temperatura, tal que:

$$\rho\frac{ds}{dt} \geq -div\left(\frac{q}{T}\right) \qquad (3)$$

Donde ρ es la densidad, s la entropía específica, q el flujo de calor y T la temperatura. Esta ecuación plantea la irreversibilidad en la entropía de un sistema, ya que el cambio de entropía será más grande que para un proceso reversible (Lemaitre & Chaboche, 1990).

La energía libre de Helmholtz (HFE) es una función de variables de estado internas y observables (Mahmoudi & Khonsari, 2022). La temperatura y la deformación total son tipos de variables observables, mientras que la deformación elástica y el daño son ejemplos de variables internas. Es importante mencionar que las variables internas relacionan los efectos de daño, a nivel microscópico, que se originan por el efecto de los estados de carga, este daño implica fricciones internas de micro defectos en el material que interactúan entre sí, esto da lugar a las fuerzas termodinámicas en el material. Tal que:

$$\dot{\gamma} = \int_0^t \left(\sigma : \frac{\dot{\varepsilon}^{ie}}{T} + \frac{Y\dot{\omega}}{T} - \frac{q.\nabla T}{T^2}\right) dt \qquad (4)$$

Esta ecuación postula que la tasa de generación de entropía no negativa, consiste en la disipación mecánica debido a la deformación inelástica, la disipación de energía debido a la degradación permanente dependiente de variables internas, como el daño, y la disipación térmica debido a la conducción de calor.

Donde $\dot{\gamma}$ representa la tasa de acumulación de entropía, $\dot{\varepsilon}^{ie}$, ω, T y Y son la deformación elástica, temperatura, variable interna y las fuerzas termodinámicas, respectivamente.

4. ESTIMACION DE ENTROPIA COMO INDICE DE DAÑO EN COMPUESTOS POLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRAS

Naderi & Khonsari (2012), examinaron por primera vez el enfoque FFE en materiales compuestos. Desarrollaron un procedimiento y realizaron extensas pruebas experimentales para evaluar la generación de entropía durante pruebas de tensión-tensión y de fatiga por flexión. Investigaron el papel de la energía de histéresis en la generación de entropía y controlaron el aumento de temperatura durante el proceso de fatiga para calcular la acumulación de entropía. Sus resultados mostraron que el método FFE puede ser útil en la evaluación de la fatiga de los materiales compuestos. Sin embargo, no consideraron la energía de daño, que juega un papel más prominente en los materiales compuestos que en su contraparte metálica. Naderi y Khonsari (2013), modificaron su trabajo anterior al considerar la energía generada debido a la evolución del daño. Sus resultados demostraron que la energía de daño tiene un impacto considerable en la acumulación de entropía en los materiales compuestos. Estos resultados demostraron que la entropía aumenta casi monótonamente y puede ser un método útil en la evaluación de la fatiga de materiales compuestos.

Imanian y Modarres (2012), describieron la evolución del daño como una función de la producción de entropía hasta la falla final y definieron un límite de resistencia de entropía. Aplicaron un enfoque termodinámico basado en la entropía para evaluar el proceso de degradación. Sus resultados mostraron que la entropía es independiente de la ruta de falla y propusieron un método de confiabilidad basado en la relación entre el daño y el límite de resistencia de la entropía.

Amiri y Modarres (2014), describieron la confiabilidad y la integridad estructural mediante la generalización del concepto entrópico a la caracterización de daños. Describieron el daño como disipación y lo escalaron a una expresión de variables de campo observables. Se examinaron y evaluaron diferentes tipos de daños, como microfisuras, corrosión, desgaste y fluencia, mediante el marco de la termodinámica y unificaron la medida del daño basándose en la generación de entropía.

ISSN: 2992-8338

Kahirdeh y Khonsari (2016), midieron la emisión acústica (AE) de entropía durante la carga cíclica. Observaron que la entropía máxima de AE hasta la falla, independientemente del tipo de material y la amplitud de carga, permanece constante. Ontiveros et al. (2017) investigaron la evolución de la entropía durante el inicio de grietas por fatiga en muestras entalladas. Sus resultados mostraron que la acumulación de entropía se puede utilizar como índice para el inicio de grietas por fatiga. Sosnovskiy y Sherbakov (2017), estudiaron la capacidad del concepto de entropía en tribofatiga. Presentaron la fatiga, la fricción y el desgaste en un marco termodinámico. Sus resultados mostraron que la degradación por tribofatiga puede caracterizarse por la entropía. Jirandehi y Khonsari (2021), proponen un método para la predicción rápida de la entropía de fatiga de fractura y el aumento de temperatura para predecir la vida a fatiga. Utilizaron una función de probabilidad de Weibull para obtener las cepas de micro plásticos. Utilizaron las deformaciones plásticas estimadas estadísticamente para calcular la generación de entropía y predijeron con éxito el FFE para las predicciones de vida a fatiga para materiales que tienen sensibilidad a la microestructura.

Mahmoudi y Mohammadi (2019a, b) y Mohammadi y Mahmoudi (2018), introdujeron el modelo de daño-entropía utilizando el concepto FFE para compuestos laminados. Este modelo propone un enfoque teórico para predecir la vida a fatiga de laminados compuestos basado en el criterio FFE. Caracterizaron el comportamiento a la fatiga de compuestos laminados de capas cruzadas en términos de evolución de temperatura, viscoelasticidad, daños y deformaciones irreversibles. Consideraron tres mecanismos que producen energía durante la carga de fatiga en compuestos laminados: deformaciones irreversibles, naturaleza viscoelástica de la matriz polimérica y daño. Mahmoudi y Mohammadi también demostraron que el modelo de entropía de daño es sensible a la frecuencia de carga y a la secuencia de apilamiento del laminado. Sus resultados revelaron que, en los compuestos laminados, la entropía aumenta monótonamente durante la fatiga similar a la de los metales y que puede servir como un estado de degradación del material.

Huang *et al.* (2020), investigaron el papel de la fricción interna durante la carga de fatiga de laminados de CFRP y propusieron un método para encontrar el FFE debido a la energía dañina. Propusieron utilizar FFE para encontrar las curvas S-N para diferentes estratos y secuencias de apilamiento e implementaron un enfoque práctico para encontrar el FFE basado en la tasa de caída de la temperatura de la muestra cuando se detiene la prueba de fatiga. En este método, separaron la energía total de disipación en energía de daño y energía de fricción.

Hane y Mohammadi (2020), desarrollaron el modelo de entropía de daño para un compuesto de tejido liso bajo carga estática. Calcularon la energía del daño utilizando mecánicas de daño continuo en la meso escala. Demostraron que las generaciones de entropía acumuladas hasta la falla final eran las mismas bajo carga de tensión y carga de corte. Sus resultados indicaron que, a pesar de los diferentes escenarios de daño en diferentes casos de carga, la entropía acumulada hasta la fractura es un valor constante y puede considerarse como una propiedad del material. Afirmaron que este valor constante puede considerarse el mismo que el FFE y que puede medirse realizando una prueba estática. Mohammadi et al. (2021) estudiaron la capacidad del modelo de entropía de daño junto con la mecánica de daño micro continuo para predecir la vida a fatiga de los compuestos fuera del eje. Investigaron el concepto FFE en compuestos de carbono/epóxido y vidrio E/epóxido y demostraron que el enfoque de entropía de daño puede ser útil para predecir la vida por fatiga de compuestos laminados fuera del eje como compuestos de capas cruzadas.

6. CONCLUSIONES

Los materiales compuestos se producen a partir de al menos dos componentes (fibra y matriz) y muestran propiedades altamente anisotrópicas. A diferencia de los metales, las propiedades de los compuestos dependen en gran medida de la orientación. Por lo tanto, el uso del enfoque FFE en materiales compuestos es más complicado que en metales. En los metales, el FFE es una propiedad global del material y puede evaluar la degradación por fatiga en diferentes tipos de configuraciones de carga.

La formulación del modelo de entropía indica que el aumento de temperatura depende de los mecanismos de generación de energía, incluido el daño. Significa que la temperatura aumenta a un ritmo específico al aplicar una carga en un estado de daño específico. Por lo tanto, el daño se puede caracterizar en términos de aumento de temperatura aplicando una carga cíclica específica en diferentes estados de daño y midiendo la tasa de aumento de temperatura. Ahora, supongamos que aplicamos una carga cíclica específica a un componente con un historial de carga desconocido y medimos la velocidad de los cambios de temperatura mediante una cámara de infrarrojos y la acumulación de entropía. En ese caso, puede ser factible determinar el estado del daño. Entonces es posible determinar los ciclos de vida restantes hasta las fallas finales.

Los avances recientes en la aplicación de los principios de termodinámica son muy prometedores para caracterizar cómo los materiales se degradan debido a fuerzas de actuación cíclicas que causan fatiga y eventualmente fallan el componente. Se introdujo un índice útil de falla llamado entropía de fatiga por fractura (FFE), como propiedad del material, que representa la entropía acumulada más allá de la cual es probable que el material se fracture. El enfoque descrito en este artículo ha sido aplicado de inicio a los metales y luego se ha extendido a los materiales compuestos. Dado que los materiales poliméricos y compuestos tienden a tener un comportamiento más complejo que los metales, se puede aprender mucho mediante más investigaciones. De particular interés es ampliar los últimos trabajos sobre metales a materiales poliméricos y compuestos. Los ejemplos incluyen el desarrollo de una formulación general de entropía irreversible (Jang y Khonsari, 2021); comprender mejor la naturaleza de la degradación examinando los términos más influyentes que son responsables de los daños (Haghshenas et al., 2021); aplicar los principios a cargas complejas (Mehdizadeh y Khonsari, 2021); desarrollar una formulación entrópica para la propagación de grietas (Hajshirmohammadi

ISSN: 2992-8338

y Khonsari, 2020); y desarrollar algoritmos que puedan tratar materiales con microestructura (Jirandehi y Khonsari, 2021a,c).

REFERENCIAS

A. Wey and L. W. Kessler. (1992). Ultrasonic imaging of damage progression in composite laminates. En *1992 ULTRASONICS SYMPOSIUM* (págs. 777–782). Sonoscan, Inc., Bensenville, Illinois, 60106: IEEE.

Alcudia, E. (2016). *Bases para el Diseño de Materiales Compuestos Estructurales con Enfoque en Tolerancia al Daño.* Cuernavaca: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Amiri, M., Modarres, M., 2014. An entropy-based damage characterization. Entropy 16 (12), 6434–6463.

Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Pappalettere, C. (2016). Analysis of crack propagation in stainless steel by comparing acoustic emissions and infrared thermography data. *Engineering Failure Analysis, 69*, 35-42.

Broutman, L., & Sahu, S. (1971). The effect of interfacial bonding on the toughness of glass filled polimers. *Material Science and Engineering, 8*(2), 98-107.

Cairnsa, D. S., Nelsonb, J. W., Wooc, K., & Millera, D. (2016). Progressive damage analysis and testing of composite laminates with fiber waves. *Composites*(90), 51-61.

Carraro, P., Maragoni, L., & Quaresimin, M. (2017). Prediction of the crack density evolution in multidirectional laminates under fatigue loadings. *Composites Science and Technology*(145), 24-39.

Christian, W., DiazDelaO, F., & Patterson, E. (2017). Strain-based damage assessment for accurate residual strength prediction of impacted composite laminates. *Composite Structures*(184), 1215–1223.

Djabalia, A., Toubalb, L., Zitounec, R., & Rechaka, S. (2017). An experimental investigation of the mechanical behavior and damage of thick laminated carbon/epoxy composite. *Composite Structures*(184), 178-190.

F. C. Campbell. (2006). *Manufacturing Technology for aerospace structural.* Amsterdam: ASM international.

Giancane, S., Panella, F., & Dattoma, V. (2009). Characterization of fatigue damage in long fiber epoxy composite laminates. *International Journal of Fatigue*(32), 46-53.

Haghshenas, A., Jang, J.Y., Khonsari, M.M., 2021. On the intrinsic dissipation and fracture fatigue entropy of metals. Mechanics of Materials 155. 103734.

Hajshirmohammadi, B., Khonsari, M.M., 2020. On the entropy of fatigue crack propagation. International Journal of Fatigue 133. 105413.

Harizi, W., Chaki, S., Bourse, G., & Ourak, M. (2014). Mechanical damage assessment of Glass Fiber-Reinforced Polymer composites using passive infrared thermography. *Composites: Part B , 29*, 74-79.

Huang, J., Li, C., Liu, W., 2020. Investigation of internal friction and fracture fatigue entropy of CFRP laminates with various stacking sequences subjected to fatigue loading. Thin-Walled Structures 155. 106978.

Imanian, A., Modarres, M., 2012. A science-based theory of reliability founded on thermodynamic entropy. In: Proceedings of the Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM-12). Honolulu, HI, pp. 1–10.

Jang, J.Y., Mehdizadeh, M., Khonsari, M.M., 2020. Nondestructive estimation of remaining fatigue life without the loading history. International Journal of Damage Mechanics 29 (3), 482–502.

Jang, K., Khonsari, M.M., 2021. Experimentally validated thermodynamic theory of metal fatigue. Mechanics of Materials 160. 103927.

Jen, M.-H.R., Lee, C.-H., 1998. Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads. Part II: Formulation. International Journal of Fatigue 20 (9), 617–629.

Jirandehi, A.P., Khonsari, M.M., 2021b. On the determination of cyclic plastic strain energy with the provision for microplasticity. International Journal of Fatigue 142 (105966).

Jirandehi, A.P., Khonsari, M.M., 2021c. Microstructure-sensitive estimation of fatigue life using cyclic thermodynamic entropy as an index for metals. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 112 (102854).

Jirandehi, A.P., Khonsari, M.M., 2021a. General quantification of fatigue damage with provision for microstructure: A review. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures.

Jones, R. M. (1999). *Mechanics of Composite Materials, second edition.* UK: Taylor and Francis.

Kahirdeh, A. (2014). Energy Dissipation and Entropy Generation During the Fatigue Degradation : Application to Health Monitoring of Composites.

Kahirdeh, A., Khonsari, M.M., 2016. Acoustic entropy of the materials in the course of degradation. Entropy 18 (8), 280.

Kordatos, E., Aggelis, D., & Matikas, T. (2012). Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission. *Composites: Part B, 43*, 2676-2686.

Kordatos, E., Dassios, K., Aggelis, D., & Matikas, T. (2013). Rapid evaluation of the fatigue limit in composites using infrared lock-in thermography and acoustic emission. *Mechanics Research Communications, 54*, 14-20.

Lemaitre, J., & Desmorat, R. (2005). *Engineering damage mechanics ductile, creep, fatigue and brittle failures.* Cachan, France: Springer.

Lemaitre, L., & Chaboche, J. (1990). *Mechanics of solid materials.* London: Cambridge University Press.

ISSN: 2992-8338

Liakat, M., & Khonsari, M. (2016). Analysis and life prediction of a composite laminate under cyclic loading. *Composites Part B, 84*, 98-108.

Lisle, T., Bouvet, C., Pastor, M., Margueres, P., & Corral, R. P. (2013). Damage analysis and fracture toughness evaluation in a thin woven Damage analysis and fracture toughness evaluation in a thin woven. *Composites: Part A, 53*, 75-87.

M. Naderi, A. K. (2012). Dissipated thermal energy and damage evolution of Glass/Epoxy using infrared thermography and acoustic emission. *Composites: Part B, 43*, 16131620.

Mahmoudi, A., & Khonsari, M. (2022). Entropic Characterization of Fatigue in Composite Materials. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers, 2*, 147-162.

Mahmoudi, A., & Mohammadi, B. (2019). On the evaluation of damage entropy model in cross-ply laminated composites. *Eng Fract Mech, 219*, 106-126.

Mahmoudi, A., & Mohammadi, B. (2019). On the evaluation of damage-entropy model in cross-ply laminated composites. *Engineering Fracture Mechanics, 219*.

Marino, Q., Luca, S., & Ramesh, T. (2009). Fatigue behaviour and life assessment of composite laminates under multiaxial loadings. *International Journal of Fatigue*(3), 2-16.

Mayer, R. (1993). Design with reinforced plastics: a guide for engineers and designers. U.K.

Mohammadi, B., & Mahmoudi, A. (2018). Developing a new model to predict the fatigue life of cross-ply laminates using coupled CDM entropy generation approach. *Theor Appl Fract Mech, 95*, 18-27.

Mohammadi, B., & Mahmoudi, A. (2018). Developing a new model to predict the fatigue life of cross-ply laminates using coupled CDM-Entropy generation approach. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.

Mohandesi, J. A., & Majidi, B. (2009). Fatigue damage accumulation in carbon/epoxy laminated composites. *Materials and Design, 30*, 1950–1956.

Montesano, J., Fawaz, Z., & Bougherara, H. (2013). Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite. *Composite Structures, 97*, 76-83.

Naderi, M., & Khonsari, M. (2012). Thermodynamic analysis of fatigue failure in a composite laminate. *Mech Mater, 46*, 113-122.

Naderi, M., & Khonsari, M. (2013). On the role of damage energy in the fatigue degradation characterization of a composite laminate. *Composites: Part B, 45*, 528-537.

Naderi, M., Amiri, M., & Khonsari, M. (2010). On the thermodynamic entropy of fatigue fracture. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 466*(2114), 423-438.

Naderi, M., Amiri, M., & Khonsari, M. M. (2010). On the thermodynamic entropy of fatigue fracture. *The Royal Society, 466*, 423-438.

Oliveros, F. (2020). *Bases para la estimación de la acomulación del daño en materiales compuestos laminados.* Cuernavaca: CENIDET.

Razvan, A., Bakis, C. E., Wagneez, L., & Reifsnider, K. L. (1988). Influence of cyclic load amplitude on damage accumulation and fracture of composite laminates. *composites technology*(1), 3-10.

Reifsneider, K., Case, S., & Duthoit, J. (2000). The mechanics of composite strength evolution. *Composites Science and Technology , 60*, 2539-2546.

Rodriguez, C. (2013). *patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras.* San nicolás de los garza, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Stepinski, T., Uhi, T., & Staszewski, W. (2013). *Advanced structural damage detection.* United Kingdom: Wiley.

Talreja, R. (1985). A continuum mechanics characterization of damage in composite materials. *Proc. R. Soc. Lond.*, 195-216.

Talreja, R. (1987). *Fatigue of composite materials.* Lancaster. Pa: Technomic.

Talreja, R., & Chandra, V. S. (2012). *Damage and failure of composite materials.* New York: Cambridge University Press.

Wanga, Z., Tiana, G., Meo, M., & Ciampa, F. (2018). Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography. *NDT and E International, 99*, 93-104.

Wei, B.-S., Johnson, S., & Haj-Ali, R. (2010). A stochastic fatigue damage method for composite materials based on Markov chains and infrared thermography. *International Journal of Fatigue, 32*, 350-360.

Whitworth, H. A. (1990). Cumulative Damage in Composites. *Journal of Engineering Materials and Technology, 112*, 358-361.

REDES SOCIALES

TecNM / CENIDET

@TecNMCENIDET.MX

Cenidet

Cenidet_oficial

CENIDET

http://cenidet.tecnm.mx/

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO